



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ANTTI TOIVONEN

VOIMALAITOSTEN ENERGIAATEHOKKUUDEN VALVONTA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Auto-
maatio-, kone- ja materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9. toukokuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

TOIVONEN, ANTTI: Voimalaitosten energiatehokkuuden valvonta

Diplomityö, 111 sivua, 3 liitesivua

Elokuu 2012

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Ohjaajat: Maria Nurmoranta, Eero Niemitalo, Torsti Nuto ja Tiina Stenvik

Avainsanat: voimalaitosten energiatehokkuus, energiatehokkuusvalvonta

Diplomityö on tehty yhteistyössä Metso Automaation ja Pohjolan Voiman kanssa. Työn tavoitteena on ollut kehittää helppokäyttöinen energiatehokkuuden valvontasovellus voimalaitosten käyttöhenkilökunnalle ja johdolle. Case-laitoksina olivat Pohjolan Voiman Tahkoluodon lauhdevoimalaitos ja Rauman CHP-voimalaitos. Energiatehokkuudesta on muodostunut energiantuotannon tärkein yksittäinen menetelmä kasvihuonekaasujen vähentämisessä ja polttoaineiden hyötykäytössä. Euroopan unionin uudet energiatehokkuusdirektiivit asettavat voimalaitoksille myös tiukentuneita vaatimuksia energiansäästötoimenpiteissä ja päästöjen pienentämisessä, joissa energiatehokkuus on halpa ja nopea menetelmä.

Energiatehokkuuden parantamisprosessissa voimalaitos on ajateltava kokonaisuutena. Monilla komponenteilla ja prosesseilla on vaikutus myös muihin osa-alueisiin, jotka on huomioitava kokonaisuuden tarkastelussa. Osa-prosesseja on optimoitu jo pidemmän aikaa ja tämän diplomityön tarkoituksena on ollut kehittää sovellus kokonaisuuden hallintaan. Tavoitteena on parantaa ja ylläpitää energiatehokkuutta. Sovellus käyttää hyödyksi Metso Automaation informaatiojärjestelmään kerättyjä prosessitietoja ja työkaluja. Hyvällä energiatehokkuuden valvonnalla pystytään löytämään eri vuorojen parhaat ajotavat. Tämän avulla saadaan vähennettyä polttoaineen kulutusta, parannettua polttoaineen hyötykäyttöä ja lisättyä voimalaitoksen käyttövarmuutta. Energiatehokkuuden parantaminen vähentää myös päästöjä. Saamalla tieto laitteiden tai prosessin ongelmalueista (vuodot, tukkeumat ym.), pystytään vaikuttamaan niiden parantamiseen ennen kuin ne aiheuttavat laitoksen alasajoa.

Energiatehokkuuden valvonnassa määritetään ensin laitoksen kannalta olennaisimmat seurattavat kohteet ja luodaan niille luotettavasti tarkkailtavia mittareita. Laitokset ovat yksilöllisiä ja yleisten vertailuarvojen määrittäminen ei ole aina tarpeeksi luotettavaa. Mittarit perustuvat luotettaviin referenssiarvoihin tai historiadataan arvoihin. Tämän seurauksena käyttöhenkilökunta näkee laitoksen energiatehokkuuden tason tietyssä toimintapisteessä. Voimalaitosten energiatehokkuus on iso kokonaisuus, jonka takia diplomityössä tehdyssä valvontasovelluksessa on keskitytty laitoksen kannalta olennaisimpiin kohtiin. Sovelluksen informaation on oltava luotettavaa, jotta vältetään riskitilanteet. Pidemmän aikavälin testauksella haetaan laitoksen mittaristolle parhaat raja-arvot. Sovellus keskittyy normaaliajoon eikä huomio kustannuspuolta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Program in Automation Technology

TOIVONEN, ANTTI: Energy efficiency monitoring in power plants

Master of Science Thesis, 111 pages, 3 Appendix pages

August 2012

Major: Power Plant and Combustion Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Tutors: Maria Nurmoranta, Eero Niemitalo, Torsti Nuto and Tiina Stenvik

Keywords: Energy efficiency, power plants information system, power plant energy management, energy efficiency monitoring

This master thesis has been done in cooperation with Metso Automation and Pohjolan Voima. The goal was to generate a handy energy efficiency monitoring application for power plants users and management. Case plants were Pohjolan Voima's Tahkoluoto's condensing power plant and Rauma's CHP power plant. Energy efficiency has become one of the best methods to reduce energy production emissions and fuel consumption. EU's new directives are setting new strict limits to power plants energy saving and green house gas emission reduction. Energy efficiency is the quickest and cheapest way to reduce CO₂ emissions.

Power plant must be considered as a one big unity. When we enhance plants energy efficiency, it is important to observe all the necessary components and processes which affect plants energy efficiency. Some of the processes have been optimized for a long time, and the goal for this thesis was to develop an application for managing the ensemble. The application is taking advantage of Metso Automation information system data and tools. With good control of energy efficiency there is a potential to achieve a reduction of fuel consumption and increase plant reliability. Improving energy efficiency will also reduce emissions. By getting the information from equipment or process problem areas (leaks, blockages, etc.) it is possible to improve them before they can incur serious problems for example plant shutdown.

Energy efficiency is defined first by choosing the most relevant monitoring objects and creating reliable indicators for them. Plants are unique and they differ a lot so that is the reason why it is not always reliable enough to perform general indicators. Energy efficiency indicators are based on reliable reference values, or history data values. As a result, the plants users can see the best operating points. With good energy efficiency indicators it is possible to know the good values in certain operating points. Power plants energy efficiency is a big package, which why this thesis is focused on the most essential points. Application is also focused on plants normal running, start-ups and shut downs are not monitored. Information must be reliable in order to avoid high-risk situations. The long-term testing of a set of indicators is applied for the plant the best threshold values.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Metso Automaation ja Pohjolan Voiman kanssa. Haluan kiittää Metso Automaatiota erittäin mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityön aiheesta. Esitän kiitokset työni tarkastajana olleelle professori Risto Raikolle monista keskusteluista diplomityöhöni liittyen. Erityiskiitos kuuluu hyvälle ja ammattitaitoisille ohjaajilleni Maria Nurmorannalle (Metso Automaatio), Eero Niemitalolle (Rauman Voima), Torsti Nutolle (Proma Palvelut, Tahkoluoto) ja Tiina Stenvikille (Metso Automaatio). Diplomityön ohjausryhmä oli erittäin suuri, joka mahdollisti erilaisten mielipiteiden ja ajatuksien jakamisen. Suuret kiitokset Pohjolan Voiman Juha Koukille hyvistä ajatuksista ja näkökulmista työhön sekä aiheen käsittelyyn liittyen. Kiitokset kuuluvat myös ohjausryhmän muille jäsenille Tuomo Suhoselle, Timo Pitkäselle ja Esa Jokiniemelle. Aiheen laajuuden vuoksi työtunteja kului paljon, mutta työmäärä ei mielenkiintoisen kokonaisuuden takia tuntunut raskaalta.

Tampereella 29.8.2012

Antti Toivonen

SISÄLLYS

Tiivistelmä.....	II
Abstract	III
Alkusanat.....	IV
Terminologia	VIII
1. Johdanto.....	10
1.1. Tausta.....	10
1.2. Työn tavoite ja rajaukset.....	10
1.3. Metso	11
1.4. Pohjolan Voima.....	11
2. Voimalaitosten Energiatehokkuus	14
2.1. Direktiivit ja sopimukset.....	15
2.2. Energiatehokkuus Suomen energiantuotannossa	16
2.3. Ilmastonmuutos	17
2.3.1. Energiatehokkuuden merkitys ilmastonmuutoksessa	18
2.4. Energiatehokkuuden parantamisprosessi.....	19
2.4.1. Energiatehokkuuden valvonta ja kunnossapito	20
3. Voimalaitokset ja niiden komponentit	22
3.1. Höyryprosessin hyötysuhde	22
3.1.1. Carnot-prosessi.....	22
3.1.2. Clausius-Rankine -prosessi	23
3.1.3. Hyötysuhteen parantaminen.....	24
3.2. Lauhdevoimalaitos	25
3.3. Teollisuuden vastapainevoimalaitos.....	27
3.4. Polttotekniikat	27
3.4.1. Pölypoltto	27
3.4.2. Leijupoltto	28
3.5. Kattilatyypit	29
3.5.1. Lämpivirtauskattilat.....	29
3.5.2. Luonnonkiertokattilat	30
3.5.3. Kerrosleijukattila	31
3.5.4. Kiertoleijukattila.....	32
3.6. Turbiinilaitos	33
3.7. Höyryverkko	34
3.8. Rikinpoistolaitos.....	35
4. Polttoaineiden merkitys energiatehokkuuteen.....	36
4.1. Polttoaineet	36
4.1.1. Polttoöljy.....	36
4.1.2. Kiinteät polttoaineet	36
4.2. Polttoaineiden ominaisuudet	37
4.3. Polttoaineiden kuivatus.....	39

4.4.	Lämpöpintojen likaantuminen	40
4.4.1.	Lämmönsiirto	40
4.4.2.	Painehäviö	42
5.	Voimalaitoksen energiatehokkuuden valvonta	43
5.1.	Kokonaishyötysuhde	43
5.2.	Kattilahyötysuhde	45
5.2.1.	Ulkoilman olosuhteet	45
5.3.	Kattilahäviöt	46
5.3.1.	Savukaasuhäviö	46
5.3.2.	Palamattomien polttoaineiden häviöt	47
5.3.3.	Nuohous	48
5.4.	Turbiinilaitoksen energiatehokkuus	49
5.4.1.	Turbiinihäviöt	49
5.4.2.	Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde	51
5.4.3.	Turbiinivakio	51
5.4.4.	Turbiinin ominaiskulutukset	52
5.4.5.	Generaattorin häviöt	52
5.4.6.	Lämmönsiirtimien asteisuus	53
5.4.7.	Rakennusaste	53
5.5.	Omakäyttösähkö	54
5.5.1.	Pumput	55
5.5.2.	Puhaltimet	58
5.5.3.	Paineilma	58
6.	Energiatehokkuusmittarit	59
6.1.	Mittareiden sovitteet	61
6.1.1.	Pienimmän neliösumman menetelmä	62
6.1.2.	Korrelaatiokerroin ja selitysaste	63
7.	PVO-Lämpövoima Tahkoluodon voimalaitos	64
7.1.	Kattila	65
7.1.1.	Apukattila	65
7.1.2.	Rikinpoistolaitos	65
7.2.	Turbiini	66
7.3.	Erityispiirteet	67
8.	Rauman Voima OY	68
8.1.	Höyrykattila HK5	70
8.2.	Höyrykattila HK6	71
8.3.	Höyrykattilat HK4 ja SK2	72
8.4.	Erityispiirteet	72
9.	Monitoroinnin toteutus	73
9.1.	Sovellusympäristö	73
9.2.	Sovelluksen toiminta	75
9.3.	Käyttöliittymä	76

9.3.1.	Näyttö.....	76
9.3.2.	Raportit	77
10.	Lauhdevoimalaitoksen energiatehokkuuden valvonta	79
10.1.	Kattilahyötysuhde	81
10.1.1.	Savukaasuhäviö.....	82
10.2.	Sähköntuotannon tehokkuus	84
10.3.	Omakäyttösähkö	86
10.3.1.	Seisonta-ajan omakäyttösähkö	90
10.4.	Ilmanvaihto ja lämmitys	90
10.5.	Johtopäätökset ja jatkokehitys.....	91
11.	CHP-laitoksen energiatehokkuuden valvonta.....	92
11.1.	Kattilahyötysuhde	93
11.1.1.	Savukaasuhäviö.....	94
11.1.2.	Palamattomien häviöt	96
11.2.	Turbiinilaitos	97
11.3.	Rakennusaste	97
11.4.	Omakäyttösähkö	99
11.5.	Johtopäätökset ja jatkokehitys.....	103
12.	Yhteenveto.....	105
	Lähteet.....	107
	Liite 1: Tahkoluodon kattila	112
	Liite 2: Rauma HK6.....	113
	Liite 3: Rauma HK5.....	114

TERMINOLOGIA

Lyhenteet:

BAT	Paras käytössä oleva tekniikka (Best Available Techniques)
BFB	Kerrosleijukattila (Bubbling Fluidized Bed boiler)
CHP	Sähkön- ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
CFB	Kiertoleijukattila (Circulating Fluidized Bed boiler)
CYMIC	Metso Powerin tuotenimi kiertoleijukattilalle (Cylindrical Multi-Inlet Cyclone)
DNA	Metson tuotenimi (Dynamic Network of Applications)
EEI	Energiatohokkuusindeksi (Energy Efficiency Index)
EKO	Syöttöveden esilämmitin (ekonomaiseri)
GAVO	Savukaasujen jälkilämmitin
HYBEX	Metso Powerin tuotenimi kerrosleijukattilalle. Alkuosa tulee sanoista ”Hydro Beam”
IEA	International Energy Agency
IED	Teollisuuden päästädirektiivi (IED, Industrial emissions directive)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
LCP-BREF	Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants
LUVO	Ilman esilämmitin (Luft Vorwärmer)
Metso DNA Report	Metson tuotenimi
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PVO	Pohjolan Voima Oy
SEC	Ominaisenergiankulutus (Specific Energy Consumption)

Symbolit:

α [-]	Rakennusaste
E [J]	Energia
g [m/s ²]	Putoamiskiihtyvyys
h [kJ/kg]	Entalpia
M [g/mol]	Moolimassa
\dot{m} [kg/s]	Massavirta
m [kg]	Massa
n [mol]	Ainemäärä
η [%]	Hyötysuhde

P [W]	Teho
p [bar]	Paine
Q [W]	Lämpöteho
ϕ_K [W]	Lämpöteho
Δp [bar]	Paine-ero
R [J/Kmol]	Moolinen kaasuvakio
r [-]	Korrelaatiokerroin
s [kJ/kg]	Entropia
T [K]	Lämpötila Kelvin-asteikolla
T [°C]	Lämpötila Celsius-asteikolla
t [s]	Aika
v [m/s]	Nopeus
\dot{V} [m ³ /s]	Tilavuusvirta
ρ [kg/m ³]	Tiheys
H [m]	Nostokorkeus
Q [MJ/kg]	Lämpöarvo
W [kg/s]	Savukaasun virtausnopeus
A [m ²]	Pinta-ala
ΔT [°C]	Lämpötilaero
R_{cond}	Lämpövastus
λ [W/K*m]	Lämmönjohtavuus
α_t [W/K*m ²]	Lämmönsiirtokerroin
K [W/K*m ²]	lämmönläpäisykerroin
k_f	Likaantuneen lämmönsiirtimen lämmönsiirtokerroin
R_f''	Likaantumistekijä
L [m]	Pituus
D [m]	Halkaisija
ζ	Kertavastusten summa
χ	Korjauskerroin
w [m ³ /s]	Savukaasujen virtausnopeus
N	Putkirivien lukumäärä
c [J/K*kg]	Ominaislämpökapasiteetti
U [V]	jännite
I [A]	virta
u [-]	Keskihajonta
s_x^2	varianssi
s_{xy}	Kahden muuttujan kovarianssi
x [kg/kg]	Massaosuus
λ [-]	Ilmakerroin
g [m/s ²]	Putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s ²)

1. JOHDANTO

1.1. Tausta

Diplomityö on tehty yhteistyössä Metso Automaation ja Pohjolan Voiman kanssa. Energiantuotanto kuluttaa paljon energiaa, jonka kustannukset ovat nousseet viime vuosina. Kaikki keinot energian säästämiseksi on otettava käyttöön. Uudet EU-direktiivit asettavat myös uusia tiukentuneita rajoja energian säästämiseksi ja päästöjen rajoittamiseksi. Näihin voidaan vaikuttaa merkittävästi energiantuotannon energiatehokkuuden parantamisella. Voimalaitosten energiantuotannon energiatehokkuuden parantamisella saadaan nopeasti ja edullisesti vähennettyä polttoaineiden kulutusta ja CO₂-päästöjä. Energiatehokkuuden valvonnalla pystytään seuraamaan voimalaitoksien energiatehokkuuden tilaa eri toimintapisteissä ja optimoimaan parhaat ajotavat. Diplomityössä tunnistetaan tilanteet, joissa laitoksen energiatehokkuus on alhainen. Tämän jälkeen analysoidaan energiatehokkuuden parantamista näissä tilanteissa. Voimalaitoksen automaatiojärjestelmä vastaanottaa tuhansia mittaustuloksia joka sekunti, joiden perusteella operaattorit seuraavat prosessien tilaa ja ohjaavat laitosta. Valvontasovellus hyödyntää mittaustuloksia ja muodostetaan niistä laitoksen tilaa kuvaavia energiatehokkuusmittareita. Näin saadaan käyttökäyttökunnalle tieto laitoksen mahdollisista epäkohdista ja pystytään reagoimaan niihin mahdollisimman nopeasti.

1.2. Työn tavoite ja rajaukset

Tavoitteena oli kehittää työkalu laitoksen energiatehokkuuden päivittäiseen ja pidemmän ajanjakson valvontaan. Käyttöliittymän on oltava käyttäjäystävällinen ja kerrottava käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnalle, toimiiko laitos tietyssä toimintapisteessä parhaalla mahdollisella energiatehokkuudella. Sen on myös johdatettava käyttäjä nopeasti mahdollisen poikkeaman alkulähteille. Mittareiden tulee kuvata energiatehokkuutta konkreettisesti ja niihin on pystyttävä vaikuttamaan käytännössä esimerkiksi ajotapoja yhtenäistämällä tai säätöteknisesti. Sovellukset suunnitellaan Metso DNA informaatioteknologiaan perustuen ja käyttöön otetaan case-laitoksien Metso DNA-järjestelmiin olemassa olevilla työkaluilla.

Diplomityössä keskitytään energiantuotannon energiatehokkuuden valvontaan ja kehittämiseen. Pääpaino on case-laitoksien energiatehokkuuden parantamisessa. Näkökulma työssä on ollut enemmän prosessien kehittämisessä ja valvonnassa, eikä niinkään säätöjen parantamisessa. Työssä ei kiinnitetä huomiota mahdollisiin investointeihin, kustannuksiin eikä takaisinmaksuaikoihin.

Rauman Voiman energiatehokkuuden analysoinnissa keskitytään kiinteän polttoaineen kattiloihin HK5 ja HK6. Kattiloiden HK4 ja SK2 osalta ei suoriteta energiatehokkuuden valvontaa, koska niiden merkitys laitoksen kannalta ei ole niin oleellista. Tahkoluodon voimalaitoksessa ei kiinnitetä huomiota apukattilan energiatehokkuuteen.

1.3. Metso

Metso on kansainvälinen teknologia- ja palvelutoimittaja prosessiteollisuuden asiakkailleen kaivos-, maarakennus-, massa ja paperi-, voimantuotanto- sekä öljy- ja kaasualalla. Sen liikevaihto oli vuonna 2011 6 646 miljoonaa euroa ja se työllistää noin 30 000 työntekijää yli 50 maassa. (Metso 2012)

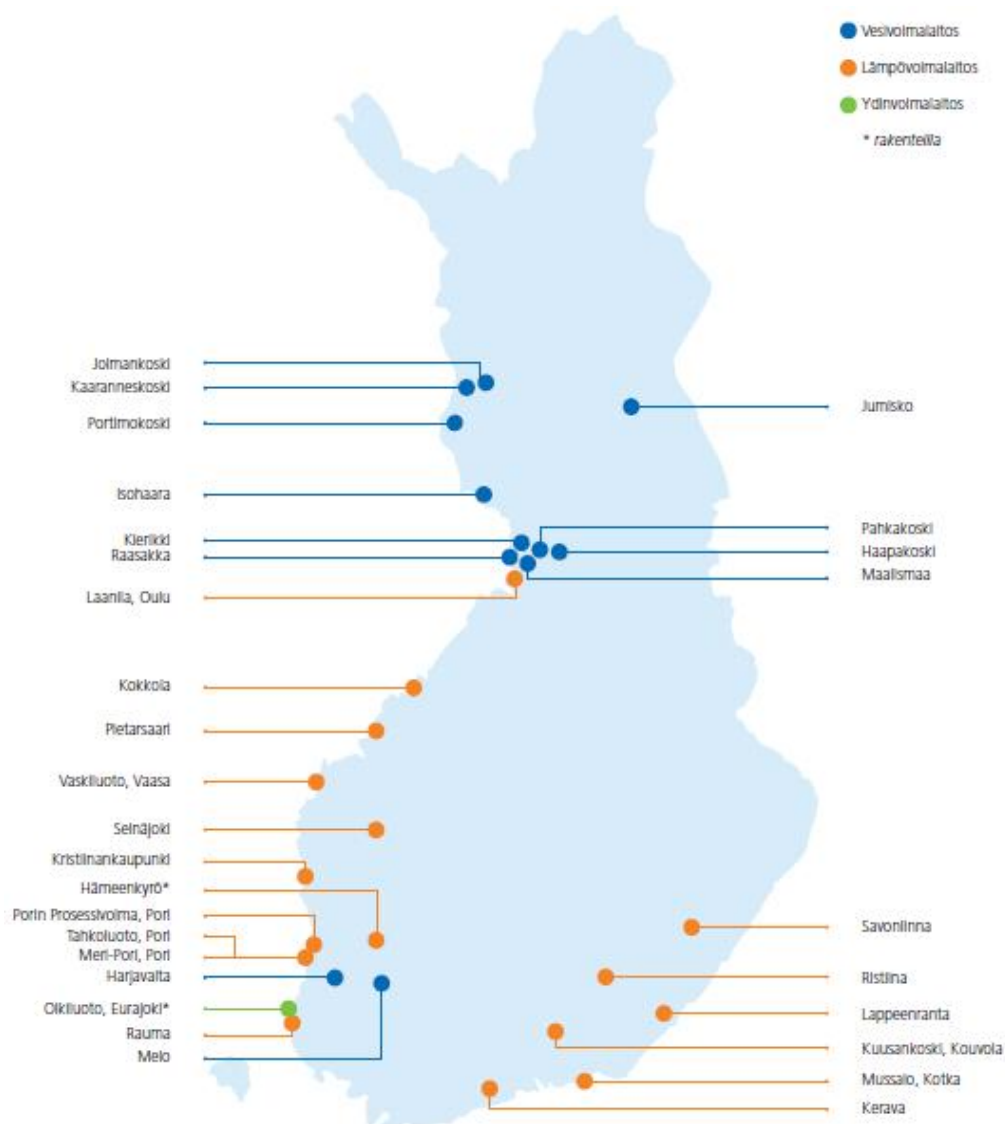
Metso Automaation ratkaisut ja palvelut tehostavat tuotantoprosesseja raaka-aineiden ja energialähteiden niukentuessa ja niiden käytöstä aiheutuvien kustannusten kohotessa. Asiakkaat pystyvät automaation tuotteiden ja palveluiden avulla kehittämään omia tuotantoprosessejaan, joissa pienetkin parannukset mahdollistavat usein merkittäviä kustannus-, materiaali- ja energiatehokkuuden nousua. Metso Automaatio tarjoaa asiakkailleen syvällisen asiakasteollisuuksien tuntemuksen, teknologiajohtajuuden sekä globaalin palveluverkoston kolmessa liiketoimintalinjassa, joita ovat prosessiautomaatiojärjestelmät (Process Automation Systems), virtauksensäätö (Flow Control) ja palvelut (Services). Prosessiautomaation suurimmat asiakasteollisuudet ovat massa- ja paperiteollisuus ja voimantuotanto. Se palvelee myös muuta prosessiteollisuutta, kuten kaivos- ja maarakennus- sekä meriteollisuutta. Prosessiautomaation tuotteita ovat esimerkiksi prosessiautomaatio- ja informaationhallintajärjestelmät, sovellusverkot sekä prosessien mittausjärjestelmät ja analysaattorit. (Metso 2012)

1.4. Pohjolan Voima

Pohjolan Voiman tarina alkoi vuonna 1943 vesivoimasta, jolla teollisuus varmisti energian saantinsa. Vuosikymmenien aikana Pohjolan Voimasta on kasvanut osaamiseltaan ja tuotantorakenteeltaan monipuolinen energiatalo. Painopisteet ovat vesivoima, lämpövoima ja ydinvoima. Vuoden 2012 aikana valmistuu Hämeenkyröön Pohjolan Voiman 15. biopolttoaineita käyttävä voimalaitos. Osakkuusyhtiön Vaskiluodon Voiman voimalaitokseen Vaasaan valmistuu biokaasutin, joka korvaa merkittävästi hiilen käyttöä metsähakkeella. Myös Iijoen vesivoimalaitoksen perusparannusinvestoinnit saadaan päätökseen lähivuosina. Olkiluodossa rakennetaan kolmatta ydinvoimayksikköä, suunnitellaan neljättä ja jatketaan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustilan rakentamista. Investoinnit kolminkertaistavat Olkiluodon sähköntuotannon.

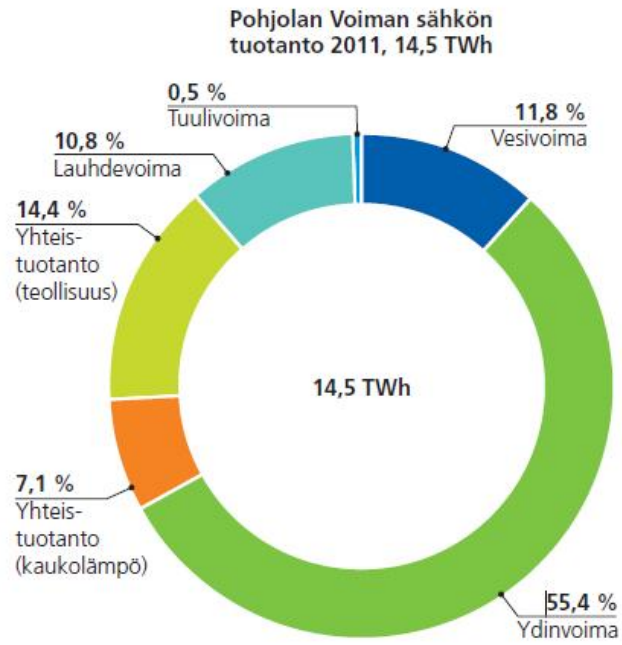
Pohjolan Voima tuottaa omakustannushintaista energiaa omistajilleen ja hallitsee voimalaitosten koko elinkaaren luotettavasti, kustannustehokkaasti sekä

ympäristöä säästään. Omakustannushintaan perustuva toimintamalli on tehokas tapa toteuttaa energiainvestointeja. Toimintamalli mahdollistaa sen, että hankkeisiin osallistuu suoraan ja välillisesti laaja joukko erikokoisia yrityksiä ja kuntia. Pohjolan Voima keskittyy suuren mittakaavan sähkön ja lämmön tuotantoon osakkailleen. Kokemusta ja osaamista pystytään hyödyntämään parhaalla mahdollisella tavalla suurissa hankkeissa. Määrätietoisilla investoinneilla hiilidioksidipäästöttömän tuotannon osuus nousee viime vuosien 70 prosentista 90 prosenttiin vuoteen 2015 mennessä. Näin Pohjolan Voima osaltaan myötävaikuttaa energia-alan tavoitteeseen olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Tulevina vuosina Pohjolan Voiman haasteena on muun muassa lämpövoimalaitosten typen oksidien päästöjen vähentäminen ja tuhkan hyötykäytön kehittäminen edelleen. (Pohjolan Voima 2012)



Kuva 1.1: Pohjolan Voiman tuotantomuodot paikkakunnittain (Pohjolan Voima 2012).

Kuvassa (1.2) on esitetty Pohjolan Voiman sähkön hankinta vuodelta 2011.



Pohjolan Voiman sähkön tuotannon osuus Suomen sähkön kokonais-
tuotannosta oli noin 20 % vuonna 2011.

Kuva 1.2: Pohjolan Voiman sähkön hankinta vuodelta 2011 (Pohjolan Voima 2012).

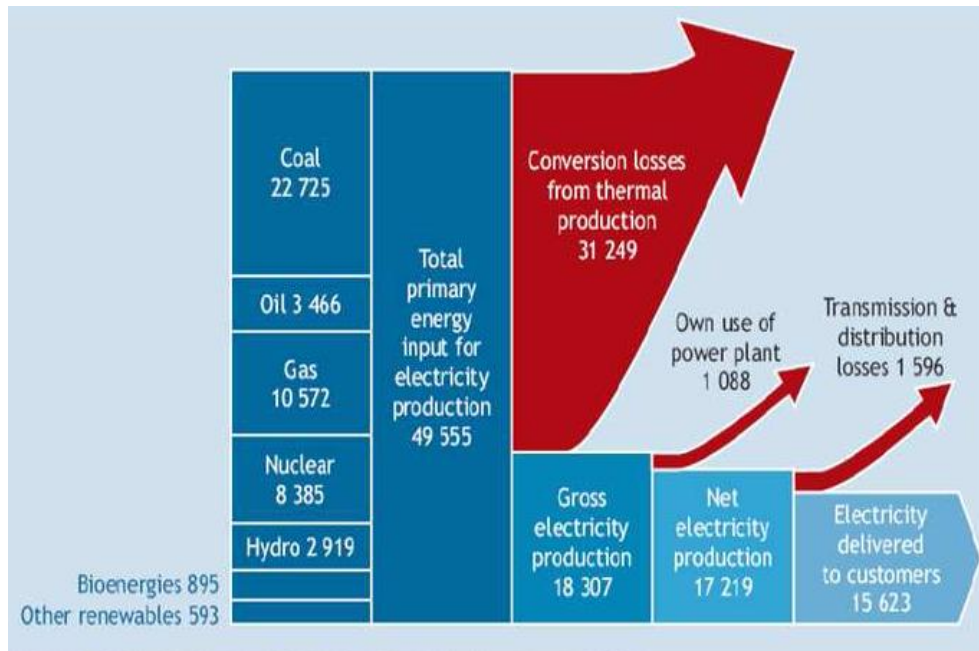
2. VOIMALAITOSTEN ENERGIAATEHOKKUUS

Nykyaikaisissa teollisuus- ja tuotantolaitoksissa tuotantoprosessit täyttävät erittäin hyvin niille asetetut vaatimukset ja oleellisia parannuksia on vaikea saada. Säästöjä ja epäsuoria vaikutuksia tuotannon tehostamiseen on haettava muilta alueilta, jossa yhtenä potentiaalisena kohteena on energiantuotantolaitosten ja energiantensiivisen teollisuuden energiatehokkuus. (Stenvik et al. 2011)

Energiamarkkinoiden muutokset vaikuttavat energian kulutukseen ja hintaan. EU:n päästökauppa ja ilmastotavoitteet, sääolosuhteet sekä Lähi-Idän epävaka tilanne ovat lisänneet energian hintaa. Globaalista kasvusta aiheutuva teknologian ja osaamisen kustannusten kasvu ovat myös kasvattaneet energian hintaa. Energian hinnassa on edelleen nousupaineita. Maailmanlaajuinen energian tarve on lisääntynyt voimakkaasti viimeisten vuosikymmenten aikana. Energian tarve tulee kasvamaan arviolta noin 50 % seuraavan 20 vuoden kuluessa, lähinnä kehitysmaiden energiankulutuksen kasvun seurauksena. Energian toimitusvarmuus on myös oltava nykypäivänä luotettavaa. Näiden syiden takia energiatehokkuuden parantamisesta on tullut yksi tärkeimmistä energiapolitiikan teemoista. (Energiateollisuus 2008, EK 2012, Motiva 2010).

Energiatehokkuudella pystytään vaikuttamaan voimalaitoksien energian säästämiseen, päästöjen vähentämiseen sekä käyttövarmuuteen. Fossiilisia polttoaineita käyttävillä voimalaitoksilla polttoainekustannusten osuus laitoksien koko elinkaaren kustannuksista on yli puolet. Polttoaineen hyötykäyttö korostuu, kun samalla polttoainemäärällä on saatava enemmän lopputuotteita. Hyötykäyttöä pystytään tehostamaan parantamalla laitoksen energiatehokkuutta. Energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa voimalaitoksissa rakenteellisilla muutoksilla, ennaltaehkäisevällä kunnossapidolla sekä prosessien ja laitteiden käyttötoiminnan optimoinnilla. (Muilu et al. 2006)

Energiantuotannon energiatehokkuudella on erittäin suuri parantamispotentiaali. Kuvassa (2.1) on esitettyä energiantuotannon Sankey-kaavio, josta nähdään maailman energiasysteemin energiavirrat. Energiantuotannon häviöiden osuus on erittäin suuri ja sitä pystytään parantamaan energiatehokkuuden kehittämisellä. (Puhakka 2012)



Kuva 2.1: Energiatuotannon Sankey-kaavio. (Puhakka 2012)

2.1. Direktiivit ja sopimukset

EU:n neuvosto antoi vuonna 1996 direktiivin (96/61/EY, IPPC-direktiivi) ympäristön päästöjen ehkäisemiseksi ja vähentämiseksi. Direktiivi tarkastelee ympäristövaikutuksia kokonaisuutena. Se pyrkii ehkäisemään suurten ja keskisuurten teollisuuslaitosten päästöjä ilmaan, veteen ja maaperään sekä jätteiden syntyä. Direktiivi edellyttää toiminnanharjoittajan käyttävän parasta käyttökelpoista tekniikkaa (BAT Best Available Techniques) ympäristön suojelemiseksi. Tavoitteena on myös varmistaa ympäristönsuojelun korkea taso ja yhtenäistää lupajärjestelmää. Toiminnot ja laitokset, jotka kuuluvat direktiivin soveltamisalaan on määritetty IPPC-direktiivin liitteessä 1. EU:n komissio laatii yhteistyössä jäsenvaltioiden, ympäristöviranomaisten ja teollisuuden kanssa parhaan käytettävissä olevan tekniikan vertailuasiakirjoja (BREF Reference Document on Best Available Techniques). (Suomen Ympäristökeskus 2008, European Commission 2009, Väisänen 2012)

Energiatehokkuus on otettava huomioon parhaan käytettävissä olevan tekniikan arvioinnissa. Eurooppalaisen ilmastomuutosohjelman ensimmäisen vaiheen toteutuksessa energiatehokkuuden parhaan käyttökelpoisen tekniikan vertailuasiakirjaa (ENE BREF1) alettiin valmistella vuonna 2001. Se kattaa teollisuuden sektorissa ne laitokset, joissa kulutetaan tai tuotetaan energiaa. Energiatehokkuuden BAT-asiakirja valmistui kesäkuussa 2008 ja se sisältää ohjeita sekä päätelmiä energiatehokkaista tekniikoista. Energiatehokkuuden vertailuasiakirja ei ota kantaa parhailla käytössä olevilla tekniikoilla saavutettaviin energian kulutus- tai päästötasoihin. Se sisältää viitteellisiä arvoja, mitä tietyillä teknologisilla ratkaisulla voidaan saavuttaa ja esimerkkejä energiatehokkaiden menetelmien tunnistamiseksi. Asiakirja keskittyy energiatehokkuuteen, eikä käsittele energian lähteitä. Energiatehokkuuden BREFiä tulee

käyttää yhdessä muiden BREFien kanssa, koska esimerkiksi suuria polttolaitoksia koskeva BREF sisältää BAT-tietoa poltosta sekä höyryn tuottamisesta ja käytöstä. IPPC-direktiivi uudistettiin vuonna 2010 teollisuuden päästädirektiivillä (IED), joka yhdistää entisiä direktiivejä uudeksi kokonaisuudeksi. Se sisältää uudistuksia parhaan käyttökelpoisen tekniikan oikeudellisuuden sitovuuden korostamisessa ja jälkivalvontaa koskevia täsmentyneitä säädöksiä. (Suomen Ympäristökeskus 2008, Ympäristöministeriö 2011)

Euroopan unioni (EU) pyrkii uudistamaan energiapolitiikkaansa 2008 säädetyllä lainsäädäntökokonaisuudella, joka sisältää laajan ilmasto- ja energiapaketin. Energiatehokkuusdirektiivillä EU pyrkii parantamaan EU:n ilmastotavoitteita, energiavarmuutta ja kilpailukykyä. Energiatehokkuusdirektiivin taustalla on 20/20/20 tavoitteet ympäristön suojelemiseksi ja päästöjen vähentämiseksi. Siihen kuuluvat energiansäästötavoite, kasvihuonekaasujen vähentämistavoite sekä uusiutuvan energian lisäämistavoite. Tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 % vuoteen 2020 mennessä, vuoden 1990 tasoon verrattuna. Muut tavoitteet vuoteen 2020 mennessä ovat uusiutuvan energian osuuden nostaminen 20 %:iin, biopolttoaineiden osuuden lisääminen 10 %:iin liikenteen polttoaineista sekä energiateräskäytön lisääminen 20 %:lla. (Ekman 2000, Väisänen 2012, EK 2012)

2.2. Energiateräskäyttö Suomen energiaterästannossa

Suomen sähkön kulutuksen arvioidaan kasvavan nykyisestä 87 TWh:sta 107 TWh:iin vuoteen 2025 mennessä (Motiva 2010). Energian säästö ja energiateräskäyttö ovat olleet Suomen energiapolitiikan keskeisiä teemoja jo monta vuosikymmentä. Energiansäästöohjelmat ovat tehneet toimista pitkäjänteisiä ja suunnitelmallisia. Suomen kansallinen energiateräskäytön toimintasuunnitelma on laadittu energiateräskäytöndirektiivin (2006/32/EY) velvoitteen perusteella. Sen perusteella tehdään toimenpiteet ja seurataan tulosten kehittymistä. Suomi on parantanut energiateräskäyttöään vapaaehtoisten energiateräskäytössopimusten kautta. Ne eivät kuitenkaan riitä täyttämään EU:n velvoitteita. (KTM 2007, EK 2012)

Energiateräskäytöndirektiivi velvoittaa EU-maita ottamaan käyttöön kansalliset velvoitejärjestelmät tai niitä vastaavat muut toiminnot. Käytännössä velvoitejärjestelmä edellyttää, että energiayhtiöiden vastuulla on säästää energiateräskäyttöä 1,5 prosenttia vuosittain. Prosenttiosuus lasketaan energiayhtiöiden edellisen vuoden vuosimyynnistä. Suomessa ohjeellinen energiansäästötavoite on ajanjaksona 2008 – 2016 17 TWh. Kansallisia tavoitteita asetettaessa jäsenvaltio voi ottaa huomioon esimerkiksi: jäljellä olevan kustannustehokkaan energiansäästöpotentiaalın, muutokset energian tuonnissa ja viennissä, muutokset uusiutuvien energiateräskäytön käytössä sekä ydinvoiman ja hiilidioksidin talteenoton. Jäsenvaltion on laadittava 1.1.2014 mennessä kansallinen lämmitys- ja jäähdytysuunnitelma. Siinä pitää huomioida, että uusista ja peruskorjattavista sähköntuotantolaitoksista (> 20 MW) on laadittava kustannus-hyötysuhteiden analyysi. Analyysissä selvitetään vaihtoehdot toteuttaa laitos

yhteistuotantolaitoksena. Velvoitteen ulkopuolella voidaan tietyillä ehdoilla jättää vara – ja huippuvoimalaitoksia sekä ydinvoimalaitokset. Ohjeellisesta direktiivistä äänestetään vielä syys-lokakuussa 2012 EU:n parlamentissa. Lisäksi vaaditaan hyväksyntä neuvostolta. Hyväksynnän jälkeen alkaa toimeenpano Suomessa ja direktiivi astuu voimaan vuoden 2014 alussa. (Väisänen 2012, EK 2012)

Motivan selvityksen mukaan vuosina 2008–2010 energiatehokkuussopimusten takia lämpöenergiaa ja polttoaineita säästettiin 2,6 TWh ja sähköä 1,3 TWh. Energiakustannuksissa tämä tarkoittaa 130 miljoonan euron säästöä. Hiilidioksidipäästöjä kyseisenä ajanjaksona saatiin energiatehokkuussopimuksilla vähennettyä 130 tonnia. Säästöistä 25 % kohdistui energiantuotantoon, 70 % teollisuuteen ja 5 % muihin aloihin. (Motiva 2012)

Kauppa- ja teollisuusministeriö (TEM) myöntää osaan energiatehokkuutta lisääviin investointeihin taloudellista tukea. Tukea voi saada voimalaitosten energiakatselmukseen -ja analyysiin enintään 40 % kustannuksista, energiaa säästäviin investointeihin enintään 15–20 % kustannuksista sekä uuden teknologian hankintaan enintään 30 % kustannuksista (Muilu et al. 2006). Vuosina 2008–2010 myönnettiin 23,1 miljoonaa euroa tukea energiakatselmuksiin ja energiainvestointeihin. Ajanjaksona tehtiin 190 miljoonalla eurolla investointeja säästötoimenpiteiden toteuttamiseksi, joista energiantuotannon osuus oli 57 %. (Motiva 2012)

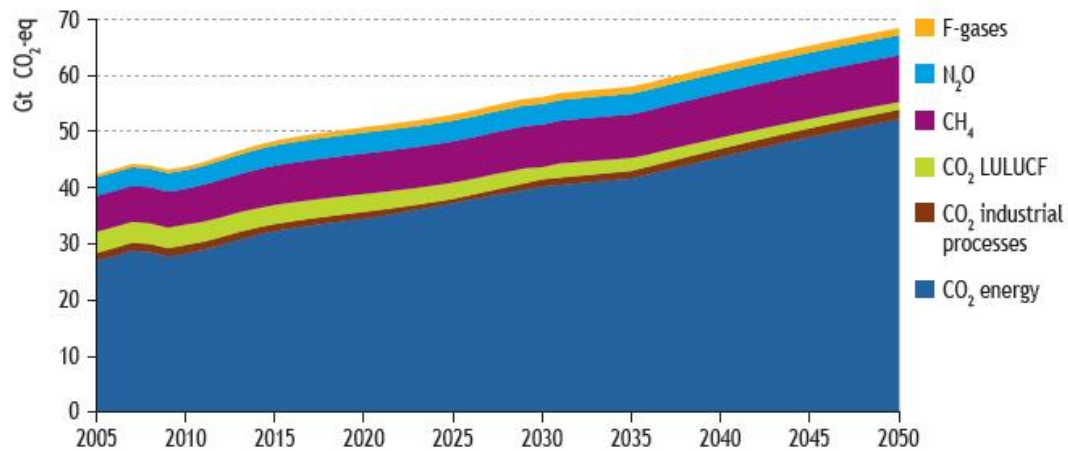
2.3. Ilmastomuutos

Ihmisten toiminnan seurauksena lisääntynyttä kasvihuoneilmiötä nimitetään ilmastomuutokseksi. Teollisuus, energiantuotanto, liikenne, maatalous ja kaatopaikat ovat suurimpia kasvihuonekaasujen vapauttajia. Merkittävimmät ilmastomuutosta aiheuttavat kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), di-typpioksidi (N_2O) ja halogenoidut hiilivedyt. Otsonia O_3 muodostavia välillisiä kasvihuonekaasuja ovat hiilivedyt (VOC), typen oksidit (NO_x) ja hiilimonoksidi (CO). Eniten ilmastomuutosta lisäävä tekijä on hiilidioksidi, jota aiheutuu pääosin fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Energiantuotanto aiheuttaa 60 % maailman kasvihuonekaasuista. (Antikainen et al. 2007)

Kasvihuonekaasut estävät osittain maapallosta avaruuteen menevää lämpösäteilyä, mutta eivät vaikuta avaruudesta tulevan säteilyn määrään. Tulevan ja lähtevän säteilyn välille muodostuu epätasapaino, jota kutsutaan säteilypakotteeksi eli säteilytason nettomuutokseksi. Sitä kuvataan tehona maapallon pinta-alaa kohden W/m^2 . Maapallon ilmakehässä oli hiilidioksidia vuonna 2009 melkein 0,4 promillea, mikä on lähes 40 % enemmän kuin ennen teollistumista (MMM 2012). (Ilmatieteenlaitos 2009)

2.3.1. Energiatehokkuuden merkitys ilmastonmuutoksessa

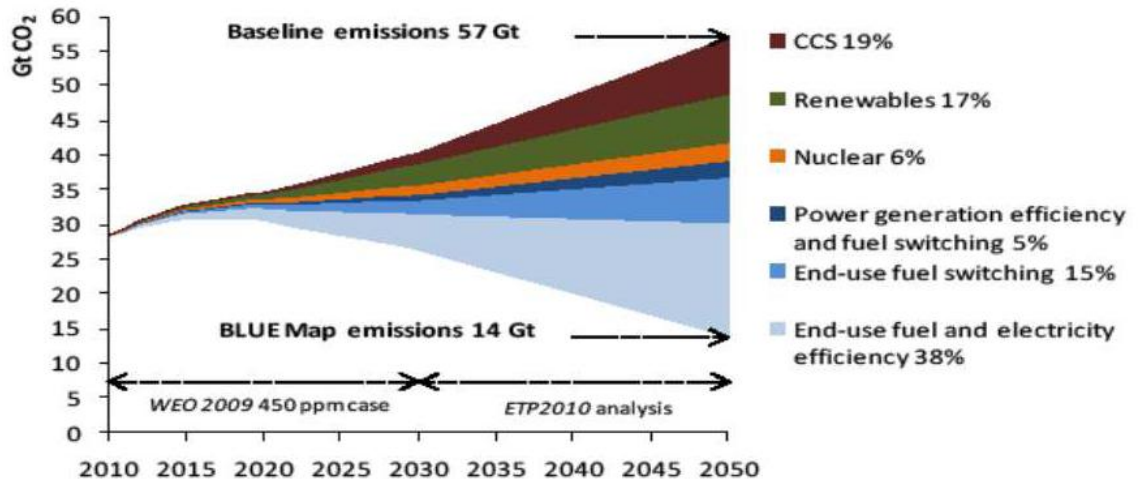
Energiantuotannon CO₂-päästöt aiheuttavat eniten kasvihuonepäästöjä maailmassa, kuten kuvasta (2.2) on nähtävissä. (World Energy Outlook 2009)



Kuva 2.2: Maailman kasvihuonekaasujen jakautuminen eri lähteiden perusteella. (World Energy Outlook 2009)

Energiantuotannon CO₂-päästöjä pyritään rajoittamaan parantamalla energian käytön tehokkuutta. Energiankäytön hyötysuhdetta voidaan parantaa yhdistetyllä sähkön ja lämmön tuotannolla ja paremmalla sähköntuotannon hyötysuhteella. Yhdistetyllä sähkön ja lämmön tuotannolla voidaan vähentää 25 – 30 prosenttia päästöjä lauhdutustuotantoon verrattuna. Siirtyminen vähemmän hiiltä sisältäviin polttoaineisiin (esimerkiksi maakaasu) ja lisäämällä uusiutuvia energialähteitä (esimerkiksi aurinko -ja tuulivoima) sekä ydinvoimaa saadaan myös vähennettyä CO₂-päästöjä merkittävästi. Hiilidioksidin talteenotto- ja loppusijoitustekniikka on myös hyödyllinen menetelmä, mutta tekniikkaa ei pystytä hyödyntämään laaja-alaisesti. Tekniikoiden käyttöönotto edellyttää verotuksen ja päästökaupan laaja-alaista kehittämistä. (VTT Energia 2004)

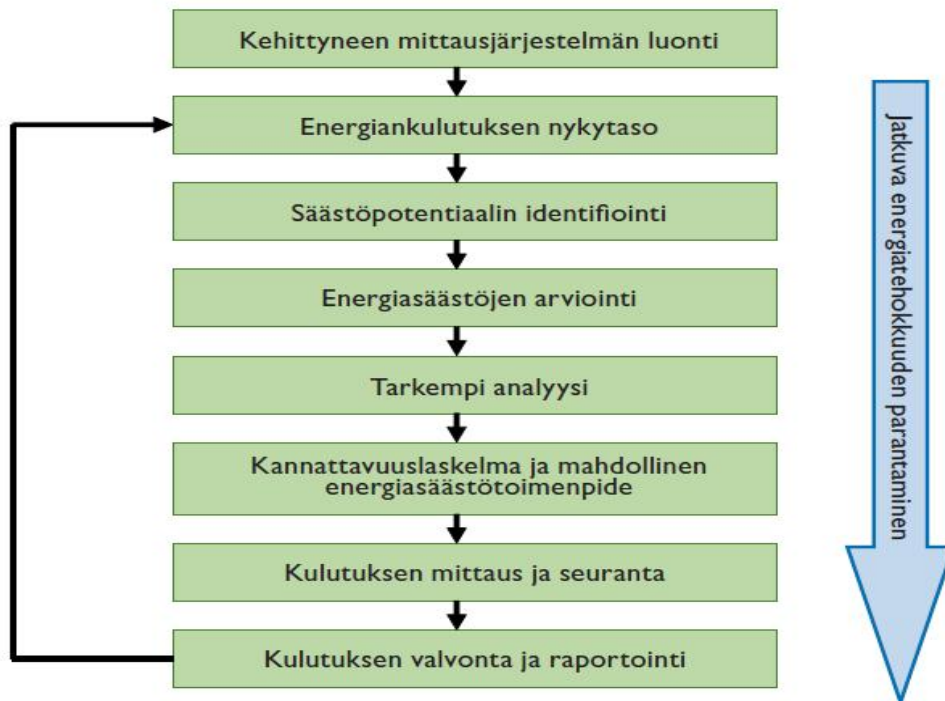
Viime vuosien monet tutkimukset ovat osoittaneet, että energiatehokkuus on tärkein yksittäinen menetelmä hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Se on myös nopein ja halvin CO₂-päästöjen vähentämiskeino. Kasvihuonepäästöjä on vähennettävä 80 % vuoteen 2050 mennessä nykyiseen tasoon verrattuna, jotta ilmaston lämpeneminen pysyy tavoitellussa 2 asteessa. Kuvassa (2.3) on esitetty eri teknologioita, joilla voidaan vähentää energiantuotannon CO₂-päästöjä. (European Commission 2009)



Kuva 2.3: Tärkeimmät teknologiat CO₂-päästöjen vähentämiseksi (Puhakka 2012).

2.4. Energiatohokkuuden parantamisprosessi

Energiatohokkuuden parantamisella saadaan sama tuotantomäärä vähäisemmällä energiankulutuksella, suurempi tuotantomäärä samalla energiankulutuksella tai tuotannon ja tuotantomäärän kasvu suhteellisesti pienemmällä energiankulutuksen kasvulla. Kuvassa 2.4 on esitetty energiatohokkuuden parantamisprosessi ja sen eri vaiheet, jota voidaan käyttää voima- ja lämpölaitosten energiatohokkuuden parantamiseen. (Suomen Ympäristökeskus 2008)



Kuva 2.4: Energiatohokkuuden jatkuvan parantamisen malli (Suomen ympäristökeskus 2008).

Prosessien ja teknologian hyvä tuntemus ovat energiansäästöavoitteiden lähtökohtana. Energiatohokkuus on oltava osa yrityksen toimintajärjestelmää.

Yrityksellä on oltava selkeät energiatehokkuustavoitteet ja suunnitelma niiden toteuttamiseksi. Työ on oltava pitkäjänteistä ja asetetun työryhmän on tarkastettava tietyin ajanjaksoin tavoitteiden toteutumista. Energiatuotannon energiatehokkuuden analysoinnissa pitää tunnistaa laitoksien erityispiirteet ja ongelma-alueet. Näistä saadaan paras informaatio tekemällä laitokselle energiakatselmus tai -analyysi. Katselmus kertoo laitoksien energiansäästöpotentiaalin, jonka perusteella voidaan tehdä päätöksiä seurattavista kohteista ja mahdollisista investoinneista, joiden tulee tukea valittuja energiatehokkuustavoitteita. Informaatiojärjestelmän dataa analysoimalla, prosessivaiheita läpikäyden ja laitoksen käyttöä haastatellen saadaan kuntokartoitusta varten tietoa laitoksen toiminnasta. Henkilökunnan kannustamisella saadaan koko yrityksen toiminta tähtäämään energiatehokkaaseen toimintaan ja tiedon lisääntyessä nähdään mahdollisuudet sekä kehitysehdotukset. Energiatehokkuuden parantamisprosessi on jatkuva prosessi, jonka tulokset näkyvät viiveellä. (Koski et al. 2002, Motiva 2010)

2.4.1. Energiatehokkuuden valvonta ja kunnossapito

Voimalaitosten hallinta edellyttää jatkuvaa valvontaa ja toimenpiteitä, niiden monimutkaisten järjestelmien vuoksi. Ensisijaisena tavoitteena on ohjata prosessia siten, että tuotantolaitoksen ohjausjärjestelmän toiminnalle asetetut tavoitteet saavutetaan parhaiten. Komponenttien kulumisen ja toiminnan heikkeneminen ovat seurauksia prosessin toiminnan aikana komponenttien kohdistuvista rasituksista. Tuotannon ylläpitämiseksi kunnossapitotoimenpiteitä ja uudistuksia on valvottava sekä tehtävä säännöllisesti. Käyttö- ja kunnossapitotehtävien vastuu jakaantuu eri henkilöille, vaikka tehtävillä on paljon yhteistä. Molemmilla tehtävillä tavoitteena on optimoida laitosten käytettävyyttä, tuotantovauhtia ja laatua. Kulumista estävät ja säätelevät toimenpiteet ovat erittäin kalliita ja vievät paljon aikaa. Toimenpiteitä tehdään vain siten, että varmistetaan mahdollisimman häiriötön tuotanto. (Joronen et al. 2007)

Voimalaitosten energiatehokkuuden valvontaan liittyvällä kunnossapidolla laitosten käyttövarmuus paranee, koska laitteiden ja prosessien tilasta saadaan tietoa ennen kuin ne aiheuttavat merkittävimpiä ongelmia. Kunnossapito jaetaan laitteiden kunnossapitoon, instrumentoinnin kunnossapitoon sekä säätöjen kunnossapitoon. Laitteiden kunnossapidossa seurataan hyötysuhteen kannalta oleellisia asioita kuten ominaisenergiankulutuksia. Turbiinin, lämmönsiirtimen tai venttiilin toimiessa huonolla hyötysuhteella ei välttämättä ole toiminnallisia ongelmia, mutta suorituskyky on huonontunut oleellisesti. Online-laskentajärjestelmä on paras vaihtoehto valvoa laitoksen kunnossapitoa. Laskentajärjestelmä tuottaa tunnuslukuja, joiden perusteella voidaan määrittää laitteiston kunto ja tunnistaa epätarkat mittaukset. Hyviä tunnuslukuja ovat esimerkiksi laitoksen, turbiinin ja kattilan hyötysuhteet, lämmönsiirtimien asteisuudet ja lämmönsiirtymiskertoimet, turbiinin isentrooppiset hyötysuhteet ja turbiinivakiot sekä vuotomäärät. Referenssilaskennan lisäämisellä saadaan tietoa tietyistä prosessin tilanteesta, joka on esimerkiksi vaihtelevaa kuormaa ajavilla laitoksilla hyvä vertailukohta. (Muilu et al. 2006)

Mittausten luotettavuus ja toistettavuus on instrumentoinnin kunnossapidossa erittäin tärkeää. Automaatiojärjestelmän yhteyteen on rakennettu seurantajärjestelmä voimalaitoksen olennaisimmille komponenteille esimerkiksi pumpuille, lämmönvaihtimille, turbiinille ja kattilalle. Ongelmana on, että raportointi ja seuranta jatkojalostavat prosessimittauksesta saatavaa tietoa, eikä varsinaiseen mittausvirheeseen päästä käsiksi. Väärin näyttävien mittauksien perusteella tehdyt analysoinnit johtavat väärin johtopäätöksiin. Mittausvirheet voivat olla stokastisia, systemaattisia, signaalihäiriöitä tai ryömintahäiriöitä. Mittausten luotettavuuteen ja toistettavuuteen on käytettävä erilaisia työkaluja esimerkiksi kalibrointeja, signaalisuodatuksia, mittausten monentamista, hajontaseurantaa tai tase seurantaa. Sopivan työkalun valintaan vaikuttaa mittausvirheen laatu. Stokastiset ja systemaattiset virheet on yleensä helppo saada hallintaan, mutta signaali- ja ryömintävirheet aiheuttavat enemmän ongelmia. Mittausten luotettavuuden ja toistettavuuden parantamisessa on tunnistettava energiatehokkuuden kannalta tärkeimmät mittaukset sekä luotava niiden mittausketjulle säännöllinen kalibroitirutiini. Kalibointi ei kuitenkaan riitä yksinään vaan se vaatii rinnalleen toisen luotettavan menetelmän. Tehokas menetelmä tarkastella vikaantuneita mittauksia ovat aine- ja energiataseet. Mittauksen muutos näkyy välittömästi taseissa ja näin saadaan seurattua ylemmän tason seurantasuureita luotettavasti. Energiatehokkuuden kannalta tärkeimpien mittausten tunnistuksen työkaluna voidaan käyttää mittausjärjestelmän katselmointia, jossa tarkastetaan asennukset, asennuspaikat, impulssiputkien sijoitus ja mittausten riittävyys. (Muilu et al. 2006, Laukkanen 2011)

Prosessisuureiden vaihtelut ovat pieniä kaikissa tilanteissa, kun säädöt toimivat riittävän hyvin. Säätimien optimaaliset parametrit muuttuvat, koska säätöpiirin osat kuluvat ja likaantuvat ajan myötä. Tämän takia säätöpiirit vaativat säännöllistä tarkastusta ja viritystä. Hyvin toimivilla säädöillä saadaan muutettua toimintapiste taloudellisemmaksi, pienennettyä suunnittelemattomien alasajojen todennäköisyyttä ja pienennettyä materiaalien ja komponenttien rasiutusta. Löytämällä sopiva kompromissi hyötysuhteen ja materiaalirajoitusten kesken voidaan pienentää prosessisuureiden vaihtelua ja muuttaa asetusarvo lähemmäksi sallittua raja-arvoa. (Muilu et al. 2006)

Energiatehokkuuden valvonnan seurauksena voidaan tehdä rakenteellisia muutoksia, joita ovat fyysiset prosessimuutokset esimerkiksi putkiston uusiminen, lämmönvaihtimien vaihtaminen optimaalisempaan, pumppujen vaihtaminen sopivampaan tai niiden säätötapojen optimointi sekä mahdolliset investoinnit uusiin laitteisiin. (Muilu et al. 2006)

3. VOIMALAITOKSET JA NIIDEN KOMPONENTIT

Tässä kappaleessa käsitellään voimalaitoksen energiatehokkuuteen vaikuttavaa teoriaa sekä työn case-laitoksien voimalaitostyyppit, polttotekniikat ja kattilatyypit.

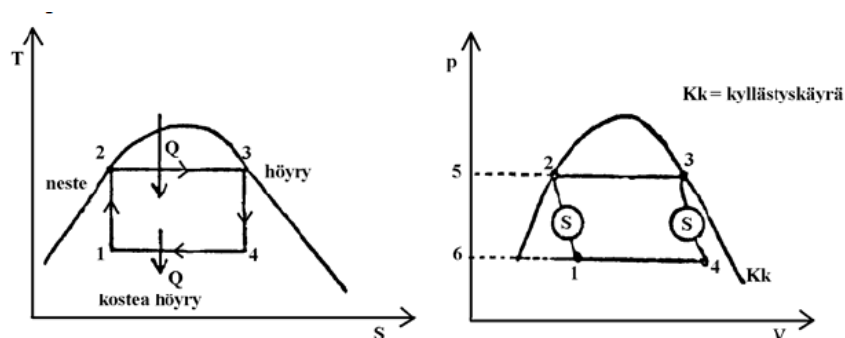
3.1. Höyryprosessin hyötysuhde

3.1.1. Carnot-prosessi

Höyryillä voidaan toteuttaa isoterminen prosessi käyttämällä hyväksi höyrystymistä ja lauhdumista. Lämpö tuodaan Carnot-kiertoprosessissa tasetilaan vakioämpötilassa. Lämpö myös poistuu tasetilasta vakioämpötilassa. Mikäli paine pidetään vakiona, kaksifaasialueella (kylläinen vesi ja höyry) lämpötilassa. Kaksifaasialueella lämmön tuominen ja poistaminen aiheuttavat faasimuutoksen, jossa lämmön tuominen höyrystää vettä ja lämmön poistaminen lauhduttaa höyryä vedeksi. (Wiksten 1996) Carnot-prosessin hyötysuhde voidaan laskea kaavalla:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (3.1)$$

missä T_{\min} on prosessin lämmönpoiston minimilämpötila, T_{\max} on prosessin lämmöntuonnin maksimilämpötila, Q_H on prosessiin tuotu lämpö, Q_L on prosessista poistuva lämpö ja W on prosessiin viedystä lämmöstä saatava työ.



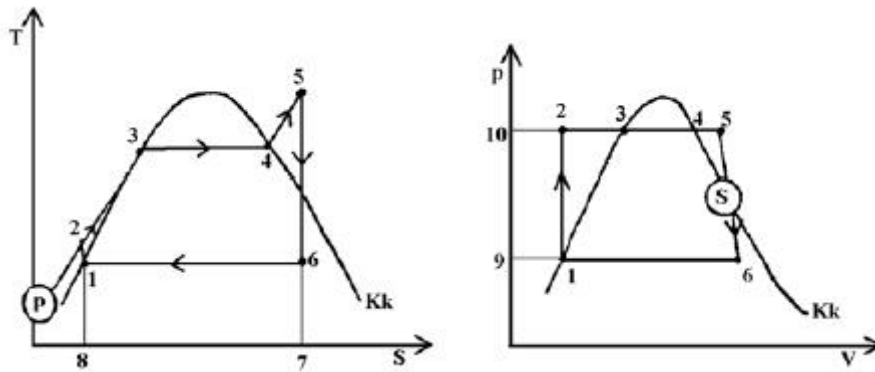
Kuva 3.1: Carnot-prosessi (Raiko & Kirvelä 2005)

Prosessi on huono käytännössä, koska puristustyö on suuri verrattuna turbiinin työhön. Nestehöyryseoksen puristaminen isentrooppisesti tuottaa vaikeuksia, koska vain höyry pyrkii kuumenemaan ja lämmön pitäisi siirtyä nestefaasiin tarpeeksi nopeasti.

Tehosuhte on Carnot-prosessissa pieni, kun paisunta ja puristuminen tapahtuvat isentrooppisesti ja todellisten prosessien palautumattomuudet pienentävät edelleen tehosuhteita. Tietyn nettotehon saamiseksi vaaditaan suuret laitteet, minkä takia höyryn ominaiskulutus on korkea. Carnot-prosessissa kostean höyryn puristaminen kylläiseksi nesteeksi on hankalaa. (Wiksten 1996)

3.1.2. Clausius-Rankine -prosessi

Carnot-prosessin käytännön ongelmat voidaan ratkaista tulistamalla höyry kattilassa ja lauhduttamalla se kokonaan nesteeksi lauhduttimessa. Clausius-Rankine-prosessissa lämmöntuonti ei tapahdu vakio- lämpötilassa niin kuin Carnot-prosessissa. Kylläinen neste lämmitetään ensin lämmöntuontiprosessin aikana höyrystymislämpötilaan, mikä laskee lämmöntuonnin keskilämpötilaa ja huonontaa hyötysuhdetta Carnot-prosessiin verrattuna. (Cengel & Boles 2011).



Kuva 3.2: Clausius – Rankine – prosessi T , S - ja p , V -tasossa. (Raiko & Kirvelä 2005)

Nesteen paine nostetaan syöttövesipumpulla vaiheessa 1-2 höyrystymislämpötilaa T_3 vastaavaan kyllästysarvoon. Vaiheessa 2-3 tapahtuu nesteen kuumentaminen kattilassa höyrystymislämpötilaan ja vaiheessa 3-4 neste höyrystyy kattilassa. Höyry tulistetaan kattilassa vaiheessa 4-5, jonka jälkeen tulistettu höyry siirtyy turbiiniin vaiheessa 5-6. Turbiinissa höyry paisuu isentrooppisesti tuottaen työtä turbiiniin kytketyn generaattorin välityksellä ja höyryn paine sekä lämpötila laskevat. Höyry siirtyy lauhduttimeen pisteessä 6 ja vaiheessa 6-1 lauhtuu kylläiseksi vedeksi. Lauhtumisessa vapautuva lämpö poistetaan lauhduttimessa jäähdyttämällä se esimerkiksi meriveden avulla. (Cengel & Boles 2011)

Clausius-Rankine – prosessin hyötysuhde ilman veden esilämmitystä saadaan jakamalla prosessista saatava teho kattilaan tuodulla lämpöteholla ϕ_K . Prosessista saatava nettoteho saadaan vähentämällä turbiinin tuottamasta tehosta P_{ST} pumppujen käyttämä teho P_{SP} . (Cengel & Boles 2011)

$$\eta = \frac{P_{ST} - P_{SP}}{\phi_K} = \frac{\Delta h_{ST} - \Delta h_{SP}}{h_{KO}} \quad (3.2)$$

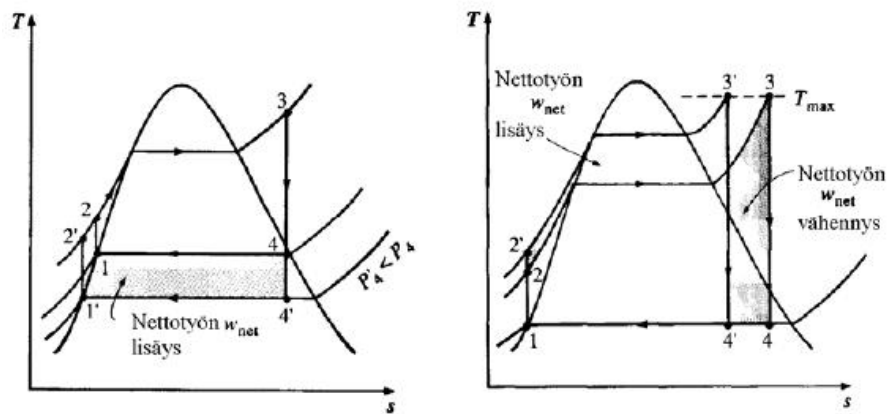
Todellisen prosessin hyötysuhde (ei isentrooppinen) saadaan kaavalla:

$$\eta = \frac{P_T - P_P}{\phi_K} \quad (3.3)$$

Clausius-Rankine-prosessin huonona puolena on se, että paisunnan loppupäässä höyry on kosteaa. Kosteus ei saa ylittää 12 % eli höyrypitoisuuden on oltava vähintään 0,88, jotta vesipisarat eivät kuluta turbiinin siipiä. (Wiksten 1996)

3.1.3. Hyötysuhteen parantaminen

Hyötysuhteen parantamisella saadaan suuria säästöjä polttoaineen kulutuksessa. Kattilan tuodun lämmön keskilämpötilaa nostamalla ja lauhduttimesta poistuvan lämmön keskilämpötilaa alentamalla on mahdollisuus parantaa höyryvoimalaitoksen hyötysuhdetta. Kuvassa (5.1) on kuvattu hyötysuhteen paraneminen lauhduttimen painetta laskemalla tai kattilan painetta nostamalla. (Cengel & Boles 2011)



Kuva 3.3: Vasemmassa kuvassa hyötysuhteen paraneminen tapahtuu lauhduttimen painetta laskemalla ja oikeassa kuvassa kattilan painetta suurentamalla. (Raiko & Kirvelä 2005)

Lauhduttimessa oleva kylläinen höyry on lauhduttimen painetta vastaavassa kyllästymislämpötilassa, minkä takia lauhduttimen paineen laskeminen laskee höyryn lämpötilaa ja lämmöntuonnin lämpötilaa. Lauhduttimen paine on yleensä alle ilmanpaineen. Paineen alarajan on oltava suurempi kuin jäähdytysaineen vastaava kyllästymispaine. Paineen alentaminen lisää höyryn kosteuspitoisuutta. (Cengel & Boles 2011)

Kattilan paineen nostaminen nostaa höyrystymislämpötilaa ja parantaa hyötysuhdetta. Lämmöntuonnin keskilämpötila nousee, kun paineen nostaminen siirtää kiertoprosessia vasemmalle T, s-tasossa ja lisää höyryn kosteuspitoisuutta, jota voidaan vähentää höyryn välitulistuksella. (Cengel & Boles 2011)

Höyryn tulistuksella saadaan nostettua lämmöntuonnin keskilämpötilaa ja vähennettyä turbiinista poistuvan höyryn kosteuspitoisuutta. Materiaalisyyt asettavat rajat lämpötilalle, johon höyry voidaan tulistaa. Tällä hetkellä suurin mahdollinen tuorehöyryn lämpötila on noin 620 °C. Korkeamman lämpötilan saavuttaminen vaatii

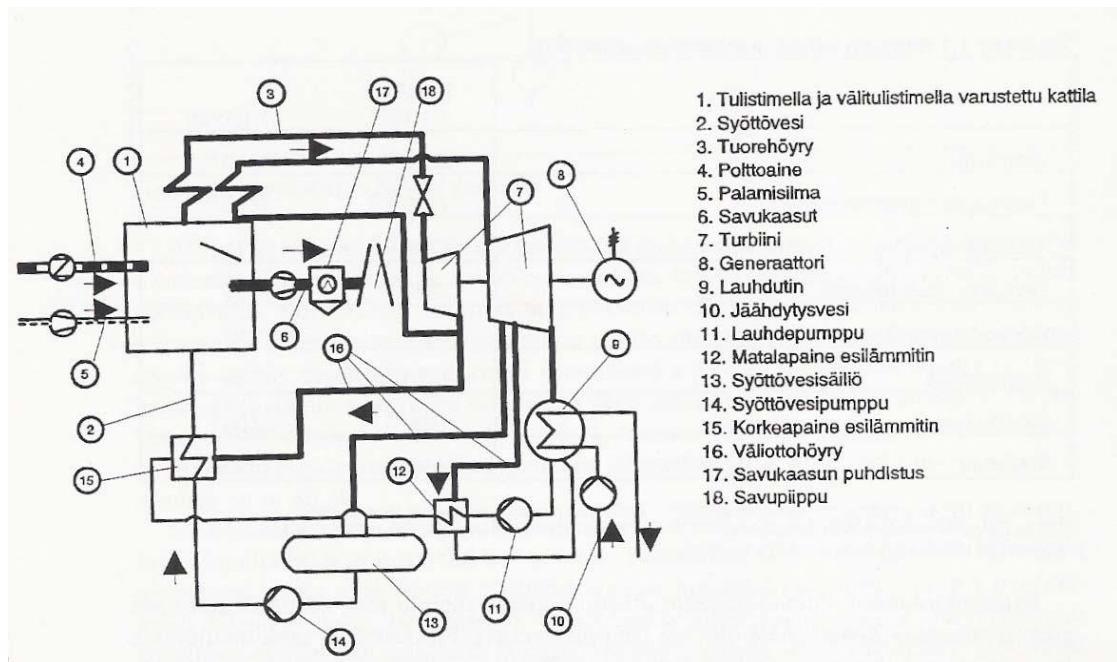
materiaalien kehitystä, jossa keraamit ovat olleet erittäin lupaavia. (Cengel & Boles 2011)

Välitulistuksella saadaan parannettua voimalaitoksen hyötysuhdetta, rakennusastetta tai sähköntuotannon tehokkuutta. Tämä vaatii, että keskimääräinen lämmöntuontilämpötila välitulistuksessa on suurempi kuin koko prosessissa. Välitulistuksen olennaisin tarkoitus on vähentää höyryn kosteuspitoisuutta. Voimalaitoksissa on yleensä yksi tai kaksi välitulistusta. Lisäämällä välitulistusten määrää voidaan parantaa keskimääräistä lämmöntuontilämpötilaa, jolloin päädytään isotermiseen prosessiin maksimilämpötilassa. Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ja normaalisti voimalaitoksissa käytetään vain yhtä välitulistusta. Teoreettisesti kahden välitulistuksen käyttäminen parantaa hyötysuhdetta puolella verrattaessa yhteen välitulistuksen. Kahden välitulistuksen käyttäminen on kannattavaa ainoastaan ylikriittisissä voimalaitosprosesseissa, joissa turbiinin sisäänmenopaine on tarpeeksi suuri ($p > 22,06 \text{ MPa}$). Kolmas välitulistus parantaa kiertoprosessin hyötysuhdetta, mutta hyöty ei ole tarpeeksi hyvä suhteessa sen tuomiin kustannuksiin. (Cengel & Boles 2011, Wiksten 1996)

Syöttöveden esilämmityksellä saadaan myös nostettua keskimääräistä lämmöntuontilämpötilaa kattilaan. Syöttöveden esilämmitys höyryllä pienentää saatavaa tehoa. Hyötysuhde nousee, mutta turbiinin läpi kulkeva höyryn määrä vähenee. Esilämmitys poistaa hapen syöttövedestä ja vähentää kattilan korroosiota. Se myös helpottaa hallitsemaan suuria höyryn tilavuusvirtoja turbiinin loppupäässä. Turbiinin väliottohöyryllä tapahtuva syöttöveden esilämmitys järjestetään siten, että vesi kuumenee jokaisessa vaiheessa yhtä paljon. Syöttöveden poistolämpötilan ja väliottohöyryjen lauhtumislämpötilan ero (asteisuus) pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. Syöttöveden esilämmitystä on käytetty kaikissa moderneissa voimalaitoksissa 1920-luvulta lähtien. (Cengel & Boles 2011)

3.2. Lauhdevoimalaitos

Fossiilisia polttoaineita käyttävillä lauhdutuslaitoksilla tuotetaan yli puolet Suomessa tuotetusta sähköstä. Lauhdevoimalaitoksen toiminnan perustana on veden ja vesihöyryn kiertoprosessi. Syöttövesi paineistetaan pumpulla ja syötetään kattilaan. Kattilassa vesi lämmitetään höyrystymislämpötilaan, jonka jälkeen se höyrystetään ja lopuksi vesihöyry tulistetaan. Kattilan jälkeen korkeapaineinen tulistettu vesihöyry paisutetaan alhaisempaan lauhduttimen paineeseen ja lämpötilaan. Osa höyryn lämpöenergiasta saadaan muutettua turbiinin mekaaniseksi energiaksi, joka generaattoria pyörittäessä muuttuu sähköenergiaksi. Lauhdutin muuttaa vesihöyryn vedeksi ja vapautuva lämpö siirretään jäähdytysveden mukana ympäristöön alhaisessa lämpötilassa. Kuvassa 3.1 on esitetty tavallisen lauhdutusvoimalaitoksen periaatekavio. (Huhtinen et al. 2000)



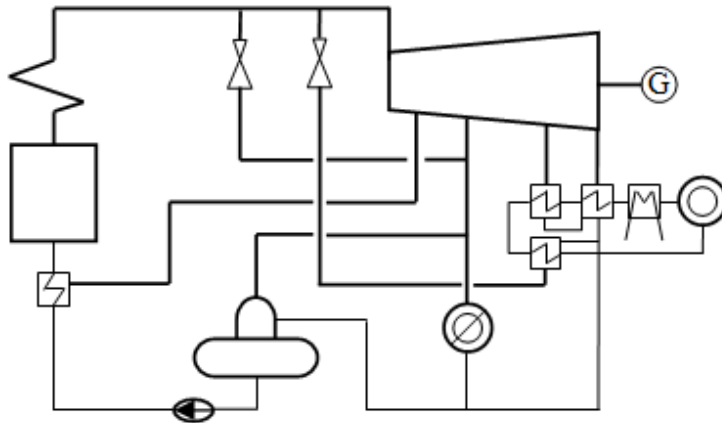
Kuva 3.4: Lauhdevoimalaitoksen toimintakaavio (Huhtinen et al. 2000).

Lauhdevoimalaitoksille on tärkeää, että niiden sähköntuotannon hyötysuhde on hyvä, koska ne toimivat nykyään usein peruskuormalaitoksina. Hyötysuhdetta saadaan parannettua tuorehöyryn painetta nostamalla, laskemalla lauhduttimen painetta, käyttämällä välitulistusta ja turbiinin väliottohöyryllä tapahtuvaa syöttöveden esilämmitystä sekä kiinnittämällä huomiota komponenttien hyötysuhteeseen. Lauhdevoimalaitoksessa päästään parhaimmillaan noin 40–42 %:n hyötysuhteeseen. Ylikriittisiä paineita, korkeampia tuorehöyryn lämpötiloja sekä välitulistuksia käyttävissä laitoksissa päästään parempaan hyötysuhteeseen. Korkeammat lämpötilat vaativat kestäviä materiaaleja, joiden taloudellisuus ei ole kannattavaa. Savukaasun mukana ilmaan ja jäähdytysveden mukana vesistöön vapautuvien höyryvirtojen lämpötiloja ei voida alhaisten lämpötilojen takia hyödyntää. Prosessin suurin häviö on lauhduttimen häviö, koska suurin osa polttoaineen energiasta poistetaan kiertoprosessista. (Joronen et al. 2007, Huhtinen et al. 2000)

Lauhdelaiteissa käytetään usein liukuvan paineen säätötapaa, joka sopii hyvin suuriin sähköä tuottaviin laitoksiin. Siinä höyryn paine muuttuu lineaarisesti kattilan tehon mukaan. Liukuvan paineen säätötapaa voidaan käyttää läpivirtaus- että lieriökattiloissa. Generaattorin tuottamaa sähkötehoa säädetään kattilan polttoaineen syöttöä muuttamalla ja höyryturbiinin säätöventtiili pidetään täysin auki. Ohjattu liukuvan paineen säätö on variaatio liukuvan paineen säädöstä. Siinä generaattorille menevää tuorehöyryvirtausta kuristetaan hieman säätöventtiilillä. Venttiilillä saadaan nopeampi säätö hetkellisiin generaattoritehon muutoksiin, vaikka se pyritään pitämään vakioasennossa. (Huhtinen et al. 2011)

3.3. Teollisuuden vastapainevoimalaitos

Sähköä ja lämpöä samassa prosessissa tuottava vastapainevoimalaitos hyödyntää valtaosan siitä lämmöstä, joka lauhdevoimalaitoksessa menee jäähdytysveden mukana ympäristöön. Lämmöntuotanto hyödyntää sähköhyötysuhteen häviöt ja lämmöntuotannon hyötysuhde on jopa 60 % polttoainetehosta. Vastapaineen tasosta riippuen, sähköntuotannon tehokkuus on noin 30 %, joka on käyttökelpoisen lämpötilan saamiseksi alhaisempi kuin lauhdelaitoksilla. Vastapainevoimalaitoksen kokonaishyötysuhde on jopa yli 90 %. Turbiinin loppupäässä vastapainelaitoksissa on korkeampi paine (vastapaine), joka tuotettavan lämmön lämpötilasta (120–50 °C) riippuen on luokkaa 100–1600 kPa. Lämpö saadaan tuotettua käyttökohteeseen höyrynä tai lauhduttimen jälkeisenä lämpimänä vetenä. Kaukolämmityksessä käytetään lämmintä vettä ja teollisuudessa höyryä. Höyry lauhtuu kaukolämmönvaihtimessa. Kaukolämpöveden lämpötila on talvisin 120 °C, jolloin vastapainepuolella täytyy olla 2–3 bar paine lämmönvaihtimen pinta-alasta riippuen. On olemassa myös matalalämpöisempiä verkkoja, joiden lämpötila on alle 100 °C. Teollisuudessa käytettävällä höyryllä saadaan siirrettyä suuria lämpötehoja ja lämmitettyä kohde nopeasti. Höyry sopii erittäin hyvin kohteiden suoraan lämmitykseen. (Joronen et al. 2007, Huhtinen et al. 2000, Perttula 2000)



Kuva 3.5: Prosessikaavio vastapainevoimalaitoksesta, jossa tuotetaan sekä kaukolämpöä että teollisuuden prosessihöyryä. (Kaukolämmityksen käsikirja 1989)

3.4. Polttotekniikat

3.4.1. Pölypoltto

Pölypolttua käytetään Suomessa pääasiassa kivihiilen ja jyrsinturpeen polttoon. Siinä polttimien kautta tulipesään tuotu hienoksi jauhettu kiinteä polttoaine palaa erittäin nopeasti ja mahdollistaa suurten lämpötehojen tuomisen tulipesään. Pölypolton edellytyksenä on riittävän hienoksi jauhettu polttoaine, jotta se ehtii palamaan tulipesässä. Kantokaasu kuljettaa polttoaineen jauhimesta tai kuivaimesta polttimeen, jossa kaasuseokset sekoittuvat. Tulipesän lämpö sytyttää polttoaineen. Syttymisen

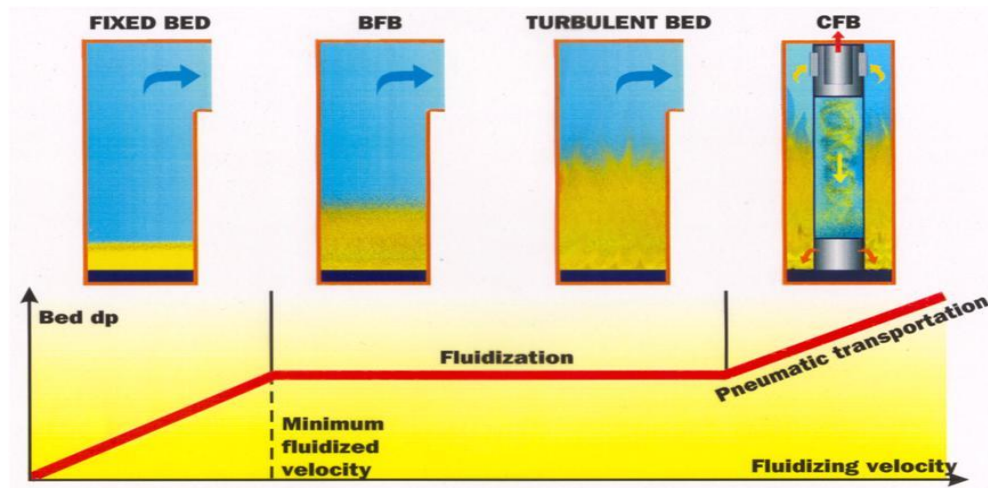
nopeuttamiseksi palamisilma on esilämmitettävä ja polttoaine kuivattava. Pölypoltto on taloudellisesti kannattavaa vasta suurilla kattilatehon arvoilla, koska se asettaa polttoaineiden käsittelylaitteille tietyt vaatimukset. (Huhtinen et al. 2000)

3.4.2. Leijupoltto

Leijutekniikka on tehokas menetelmä polttaa ympäristöystävällisesti kiinteitä polttoaineita. Sen avulla pystytään polttamaan tehokkaasti huonolaatuisia polttoaineita, joiden polttaminen muilla tekniikoilla vaatii erikoisjärjestelyjä. Leijupolton toteutusmahdollisuuksia ovat kerros – ja kiertoleiju. Leijukerroksen lämpötila vaihtelee leijupoltossa välillä 750...950 °C ja ylärajan on oltava polttoaineen tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolella. Alhaisen palamislämpötilan takia tuhka ei sula palamisprosessin aikana, minkä takia leijupoltossa ei ole kuonaantumisongelmia. Leijutila saadaan aikaan puhallettaessa kaasua rakeisen materiaalikerroksen läpi sopivalla nopeudella, leijukerroksen pohjalla olevan arinan kautta. Polttoaine palaa palamattoman, jauhemaisen ja leijuavan materiaalin muodostaman kerroksen sisällä. Minimileijutusnopeuden u_{mf} ylittäminen aloittaa leijumisen, jolloin hiukkasten jatkuva kosketus toisiinsa häviää ja ne alkavat liikkua toisiinsa nähden. Kun leijutusnopeus kasvaa, alkaa leijukerroksessa esiintyä ylöspäin nousevia kaasukuplia. Ne häviävät, kun saavutetaan terminaalinopeus.

Erilaisten polttoaineiden ja halvan rikinpoiston käytön mahdollisuus sekä vähäiset NO_x :n ja palamattomien päästöt ovat leijutekniikan selkeitä etuja. Polttoaineita ei tarvitse jauhaa tai kuivata. Palamisen hyötysuhde on yli 99 % ja tukiliekkin käyttö on tarpeetonta. Leijutekniikassa polttoaineen esikäsittely on vähäistä ja polttoaineen laatuvaihtelut eivät aiheuta ongelmia. Lämmönsiirtyminen on myös erittäin tehokasta (leijukerroksessa $\alpha = 200 - 500 \text{ W/Km}^2$) ja lämpöpintoja tarvitaan vähän. Leijupolton ongelmia ovat suuri omakäyttöteho, osakuormilla ajo on hankalaa, polttoaineen syötön järjestäminen sekä kattilan säätöjärjestelmän luotettavuus (leijukerros ei saa sulaa missään olosuhteissa). (Raiko et al. 2002, Metso Power 2007a)

Pedin käyttäytymiseen vaikuttavat ilman virtausnopeus, petimateriaali, polttoaine, pedin korkeus, palamisilmajako sekä pedin painehäviö. Kaasun nopeuden noustessa yli minimileijutusnopeuden, alkaa leijukerros kuplia. Kerrosleijupedissä kaasun nopeus on 1,0 – 3,0 m/s ja pedin korkeus 0,5 – 1,0 m. Kiertopedissä kaasun nopeus nousee 4,0 – 10,0 m/s ja yhä suurempi osa hiukkasista kulkeutuu pois pedistä. Hiukkaset palautetaan esimerkiksi syklonin avulla takaisin pedin alaosaan. (Jalovaara et al. 2003) Kuvassa 3.6 on esitetty leijutusnopeuden vaikutus paine-eroon ja virtaustyyppiin.



Kuva 3.6: Leijutusnopeuden vaikutus leijukerroksen paine-eroon ja virtaustyyppiin. (Metso Power 2007a)

Painehäviön ja lämpötilamittauksien avulla seurataan leijukerroksen käyttäytymistä. Energiatehokkuuden kannalta oleellinen suure leijukattiloissa on leijukerroksen painehäviö, koska se vaikuttaa tulipesän lämmönsiirto-ominaisuuksiin. Painehäviö on verrannollinen hiekkapatjan staattiseen korkeuteen. Matala leijukerros aiheuttaa leijutushäviöitä ja korkea lisää omakäyttökustannuksia. Painehäviön pienentyessä petimateriaali lisääntyy, hiekkaa on liikaa polttoaineessa ja vaarana on pedin sulaminen, arinalle muodostuvien sinttereiden takia. Leijukerroksen hydrostaattinen paine kaavan 3.4 mukaan on sama kuin leijutilan painehäviö. (Raiko, Raiko et al. 2002, Metso Power 2007a)

$$\Delta p_b = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g H_{mf} \quad (3.4)$$

Missä Δp_b on leijukerroksen painehäviö, ε_{mf} on kaasun tilavuusosuus, ρ_s on kiintoainetiheys, ρ_g on kaasutiheys, g on putoamiskiihtyvyys ja H_{mf} on leijukerroksen korkeus.

Arinan painehäviö Δp_d muodostuu pääasiassa kitkasta ja on suoraan verrannollinen kaasun nopeuteen. Se voidaan arvioida kokemukseräisesti leijutusmateriaalin, reaktorin säätötarpeiden ja geometrian perusteella. Ohjearvona voidaan käyttää yhtälöä 3.5. (Raiko et al. 2002)

$$\Delta p_d = (0,2 \dots 0,4) \Delta p_b \quad (3.5)$$

3.5. Kattilatyypit

3.5.1. Läpivirtauskattilat

Suuria kattilayksiköitä varten kehitetyissä läpivirtauskattiloissa ei ole lieriötä. Läpivirtauskattiloissa vesihöyrypuolen putkisto muodostaa läpikulun, jossa ei ole sisäisiä kiertoja. Virtauksen epätasaisuus tekee virtauksen hallinnasta vaikeampaa kuin

lieriökattiloilla ja saattaa aiheuttaa paikallisen ylikuumentumisen kattilaputkistossa sekä kattilavaurioita. Läpivirtauskattiloihin joudutaan välillä järjestämään keinotekoinen vastus stabiilien virtausolosuhteiden saavuttamiseksi. Stabilisaattorina voidaan käyttää kuristusventtiiliä, jolla saadaan lisättyä putkilinjojen painehäviötä.

Benson-kattiloissa höyrystymispiste vaihtelee kuorman mukaan. Läpivirtauskattiloiden haittana on, että ne vaativat puhtaampaa syöttövedtä kuin lieriökattilat, koska niissä kaikki vesi höyrystyy. Veteen mahdollisesti konsentroituvaa kattilakiveä aiheuttavia suoloja ei poisteta ulospuhalluksella. Ne soveltuvat myös ylikriittisiin paineisiin, koska vettä ja höyryä ei eroteta. Syöttöveden pumppaus vaatii läpivirtauskattiloissa paljon tehoa suurten painehäviöiden (40–50 bar) takia. Läpivirtauskattilassa tuorehöyryn paine on korkea, joka mahdollistaa hyvän sähköntuotannon hyötysuhteen. (Joronen et al. 2007, Huhtinen et al. 2000)

Benson-kattilan ominaispiirteet:

- yksinkertainen rakenne ja toiminta
- kattilan halpa hinta
- korkealuokkaisen vedenkäsittelyn ja hyvän automaation tarve
- vaativat suuren pumppaustyön
- ajettavuus ylikriittisillä höyryn paineilla. (Ahonen 1979)

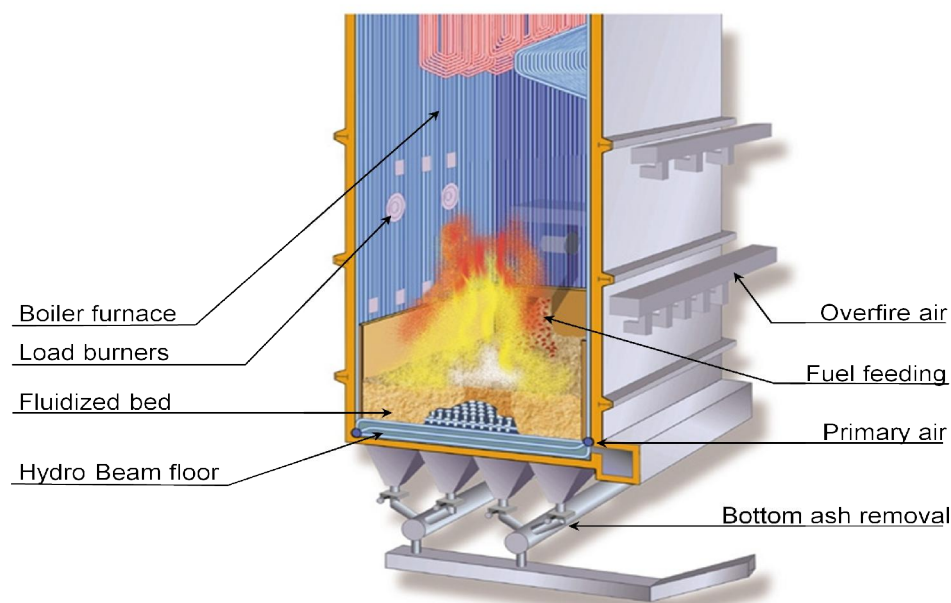
3.5.2. Luonnonkiertokattilat

Luonnonkiertokattila on vesiputkikattila, jonka tärkeimmät komponentit ovat veden esilämmitin, lieriö, höyrystin ja tulistin. Syöttövesi pumpataan syöttövesipumpulla syöttövesisäiliöstä kattilaan. Savukaasulämmitteinen syöttöveden esilämmitin lämmittää veden lähelle kylläistä lämpötilaa. Esilämmittimen käyttö parantaa kattilan hyötysuhdetta ja laskee savukaasujen lämpötilaa. Syöttövesi johdetaan esilämmittimestä lieriöön ja edelleen laskuputkia pitkin tulipesän ympärillä olevien höyrystinputkien alapäähän. Vedenlaskuputki ja höyrystinputkisto muodostavat yhtenäisen putkiston. Osa vedestä höyrystyy putkissa tulipesästä vapautuvan lämmön vaikutuksesta. Kylläisen veden ja vesihöyryn seos menee höyrystinputkista takaisin lieriöön. Lieriössä höyry ja vesi erotetaan toisistaan ja höyry nousee lieriön yläosaan, jonka jälkeen se virtaa tulistimeen. Lieriöön syötettävä uusi syöttövesi sekoittuu höyrystämättä jääneeseen veteen ja virtaa höyrystinputkiin laskuputkien välityksellä. Veden ja höyryn tiheysero aiheuttaa veden ja vesihöyryn kierron luonnonkiertokattilassa. Höyrystinputkessa olevalla veden ja höyryn seoksella on pienempi tiheys kuin laskuputkessa olevalla kylläisellä vedellä. Veden ja höyryn seos nousee kevyempänä ylöspäin ja virtaa takaisin lieriöön, josta tilalle virtaa laskuputkea pitkin tiheämpää kylläistä vettä. Luonnonkiertokattilan omakäyttöteho on pienempi kuin läpivirtauskattiloilla, koska siinä ei tarvita pumppua kierrättämään vettä höyrystimessä. Luonnonkiertokattilat eivät sovellu korkeille höyrynpaineille, koska veden ja höyryn tiheysero pienenee paineen noustessa. Kriittisessä paineessa (221 bar) veden ja vesihöyryn tiheys on yhtä suuri (315

kg/m^3). Luonnonkierron toimivuuden varmistamiseksi tulistimesta ulostulevan höyryn paineen pitää olla alle 170 bar, jolloin veden tiheys on noin viisi kertaa suurempi kuin höyryn tiheys. (Huhtinen et al. 2000)

3.5.3. Kerrosleijukattila

Leijutusmateriaalin keskikoko on kerrosleijupoltossa noin 1 mm, joka mahdollistaa leijutusnopeuden 1...3 m/s käytön. Materiaalina käytetään hiekkaa tai kalkkikiveä ja polttoaine syötetään hiekkapedin päälle. Leijukerrosihiukkaset pysyvät kerrosleijupoltossa leijukerroksessa. Biopolttoaineilla voidaan normaalipaineisessa kuplivassa leijupoltossa saavuttaa polttoaineteho 3 MW/m^2 (tehotiheys) reaktorin poikkipinta-alaa kohden. Leijutusarinan kautta tuodaan kerrosleijupoltossa noin puolet polttoilmasta ja loppuosa tuodaan jälkipalotilaan, missä voidaan ilmapaiheistuksella vähentää polton NO_x -päästöjä. Etuina kuplivassa leijukerroksessa ovat hyvä soveltuvuus polttoaineille, joiden kosteus ja lämpöarvo vaihtelevat huomattavasti sekä haihtuvien komponenttien osuus on suuri. Yksinkertaisesta rakenteesta johtuen kerrosleijukattila on halpa. Niillä on myös hyvä hyötysuhde, pienet päästöt, alhainen omakäyttöteho ja hyvä käytettävyys. (Raiko et al. 2002, Metso Power 2011)

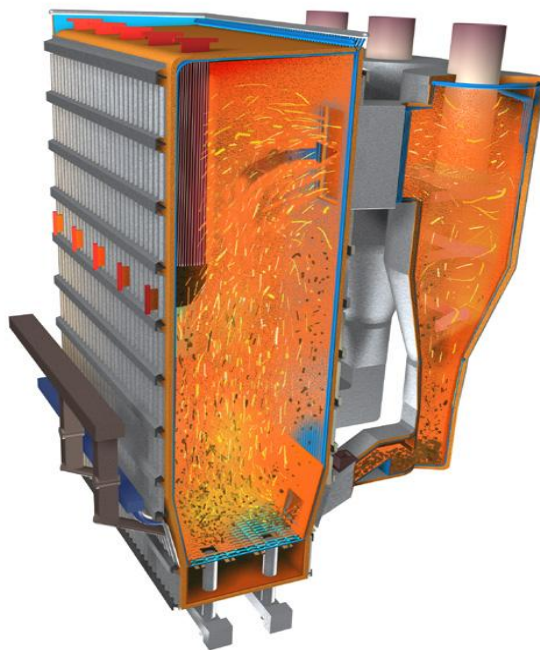


Kuva 3.7: Metso Powerin valmistama kerrosleijutekniikkaan perustuva Hybex-kattila. (Metso Power 2011)

Lämmönsiirto tapahtuu kerrosleijukerroksessa hiukkasten ja kaasun konvektion kautta ja vain pieni osa siirtyy säteilyn avulla. Leijupolton lämpötiloissa säteilylämmönsiirtokerroin α_r on luokkaa $50\text{...}120 \text{ W/Km}^2$. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin riippuu leijukerrosihiukkasen koosta. Kokonaislämmönsiirtokerroin on riippuvainen tulipesän lämpöpintojen geometriasta ja on keskimäärin luokkaa $250\text{...}280 \text{ W/Km}^2$. (Raiko et al. 2002)

3.5.4. Kiertoleijukattila

Kiertoleijupoltossa leijutusmateriaalina käytetään alle 0,5 mm halkaisijaltaan olevia hiukkasia, jotka poistuvat leijutuskaasun mukana ja ne palautetaan takaisin leijutilaan jatkuvuustilan aikaansaamiseksi. Kaasutusnopeudet ovat suurimmillaan luokkaa 8...10 m/s. Kiertoleijukattiloissa normaalipaineisen kattilan polttoaineteho reaktorin poikkipinta-alaa kohti on hiiltä poltettaessa enintään 6 MW/m^2 . Petimateriaalina käytetään hienojakoista hiekkaa ja leijukerroksessa on voimakas pyörteisyys sekä hyvä sekoittuminen. Kiertoleijukattiloilla on yleensä hiilen poltossa korkeampi palamishyötysuhde, matalammat typpi- ja rikkioksidipäästöt sekä laajempi polttoainevalikoima kuin kerrosleijukattiloilla. (Raiko et al. 2002, Metso Power 2007b)



Kuva 3.8: Metso Powerin valmistama kiertoleijutekniikkaan perustuva Cymic-kattila. (Metso Power 2007b)

CYMIC-kattila koostuu tulipesästä, syklonista, syklonin palautuskanavasta, kaasulukosta sekä 2-vedosta. Sykloni on sijoitettu tulipesän sisään ja se on kokonaan vesijäähdytteinen. Savukaasuvirran mukana poistuvien hiukkasten erotus tapahtuu syklonissa, jonka jälkeen ne palautetaan takaisin tulipesään. Kyseistä kiertoa kutsutaan ulkoiseksi kierroksi. Kiertoleijukattilassa reaktoriin muodostuu kiertomateriaalille sisäinen kierto. Siinä kiintoainehiukkaset kulkeutuvat ylöspäin sekä osa materiaalista palaa kiintoainetihentymänä alas reaktorin seinäalueella ja tasoittaa tulipesän lämpötilaeroja. Kiintoainekierrot parantavat palamisen hyötysuhdetta ja rikinpoistoa. Reaktorista poistuvan ja palautettavan kiertovirran suuruus vaihtelee kuormituksen ja kiintoaineen mukaan. Arinan painehäviön alhainen arvo vaikeuttaa leijutusta pienillä kuormitustasoilla.

Lämmönsiirto tapahtuu kieroleijukattilassa kaasukonvektion, kiintoainekonvektion ja säteilyn avulla. Kokonaislämmönsiirtokerroin saadaan laskettua näiden summana. Virtausnopeuden kasvaessa tai kiintoainekonsentraation pienentyessä kaasukonvektio suurenee. Kiintoainetihentymien käyttäytyminen vaikuttaa voimakkaasti kiintoainekonvektioon. Kaasukonvektion mittaamisen haastavuuden takia se sisällytetään usein käytännön korrelaatioissa kiintoainekonvektioon. Normaaliolosuhteissa säteilylämmönsiirron suuruus on $0...140 \text{ W/Km}^2$ ja se on suurimmillaan pienillä kaasunopeuksilla. Hiukkaskoon suurenemisella on kattilan lämmönsiirtoalueella lämmönsiirtoa heikentävä vaikutus. (Raiko et al. 2002, Metso Power 2007b)

3.6. Turbiinilaitos

Höyryvoimalaitoksessa lämpöenergian muuttaminen mekaaniseksi energiaksi tapahtuu höyryturbiineissa. Höyryturbiinit ovat yleensä ns. aksiaaliturbiineja eli höyry etenee turbiinissa akselin suunnassa. Höyry kulkee vuorotellen turbiinin runkoon pyörimistilan ulkokehälle kiinnitettyjen johtosiipien ja akseliin kiinnitettyjen juoksusiipien läpi. Juoksupyörä (roottori) koostuu akseli- ja juoksusiivistön yhdistelmästä. Johtopyörän (staattorin) muodostavat runkoon kiinnitetyt rinnakkaiset johtosiivet, joiden tehtävänä on kääntää höyryvirtauksen suunta juoksupyörän pyörimissuunnan mukaiseksi ja kiihdyttää virtauksen nopeutta. Höyry siirtää kehän suuntaista liikemääräänsä juoksupyörän siiville, jolloin virtaussuunta palautuu samaksi kuin se oli ennen johtosiipiä. Juoksusiipien sekä johtosiipien poikkileikkaukset ovat siipiprofiilin tyyppisiä ja yleensä toiselta pinnalta koveria. Peräkkäinen johtopyörä-juoksupyöräpari muodostaa yhden turbiiniasteen. (Pirilä 2008)

Voimalaitoksissa on yleensä 2 – 3 tyyppisiä turbiineja (korkea-, välipaine- ja matalapaineturbiini). Tuorehöyry tulee korkeapaineturbiiniin noin 8 – 25 MPa (80 – 250 bar) paineessa. Välitulistimeen poistuvan höyryn paine on yleensä 20 – 25 % tuorehöyryn paineesta. Höyry tulee välitulistimista välipaineturbiiniin samassa paineessa, missä se lähti välitulistimeen. Välipaineturbiinista höyry poistuu 0,1 MPa paineessa matalapaineturbiiniin, jossa paine laskee lauhduttimen paineeseen. Lauhduttimen paine on veden höyrynpaine lauhduttimen lämpötilassa ja yleensä 2 – 6 kPa (0,02 – 0,06 bar). Korkeapaineturbiineissa on tyypillisesti noin 20 turbiiniastetta, välipaineturbiineissa noin 10 ja matalapaineturbiineissa muutamia. (Pirilä 2008)

Höyryn tilavuus kasvaa voimakkaasti kun sen paine muuttuu. Virtauspoikkipinnan on vaihdeltava turbiineissa laajoissa rajoissa, koska ylimmän ja alimman paineen suhde voi olla noin 10000 sekä kaasun tiheyksien suhde noin 5000. Korkeapaineturbiinien alussa turbiinisiipien pituudet ovat senttimetrin luokkaa ja suuren matalapaineturbiinin viimeisessä asteessa yli metrin. Voimalaitoksissa tarvitaan yleensä useita matalapaineturbiineita tai kaksijuoksuisia matalapaineturbiineja, joissa höyry tulee turbiiniin akselin keskikohdalla ja virtaa kohti molempia päitä. Välipaine- ja matalapaineturbiineissa on yleensä väliulosottoja, joista otetaan höyryvirtausta ulos

turbiinin loppupainetta korkeammassa paineessa ja lämpötilassa. Niitä voidaan hyötykäyttää esimerkiksi: teollisuuden voimalaitoksissa kohteiden suoraan lämmitykseen tai kaukolämmöntuotantoon. (Pirilä 2008)

3.7. Höyryverkko

Voimalaitoksien energiatalouden tarkastelussa höyrykuormien vaihtelu aiheuttaa käytettävyydelle ja kunnossapidolle riskejä. CHP-laitoksilla on pystyttävä hyödyntämään höyryn varastointikykyä, purkamalla höyryvarastoja oikea-aikaisesti kattilakuorman huipputasoilla. Höyryakku, apujäähdytin, syöttövesisäiliö ja jatkuva ulospuhallus ovat hyödyllisiä menetelmiä höyrykuormien tasaamisessa. (Joronen et al. 2007)

CHP-laitoksiin voidaan rakentaa apulauhduttimia, joilla voidaan tuottaa enemmän sähköä. Tähän vaikuttaa sähkön markkinahinta, jolloin sähkön tuottaminen on kannattavampaa kuin lämmön. Apulauhduttimella tuotettua lisätehoa kutsutaan vastapainevoiman priimatehoksi. Niiden käyttö kuorman tasauksessa edellyttää apulauhduttimien toimintavalmiutta ja vaatii jäähdytysvesipumppujen sekä ilmapuhaltimien jatkuvaa käynnissäpitoa. Tästä johtuen apulauhduttimien käyttö ei ole usein kannattavaa. (Joronen et al. 2007)

Höyryakkua käytetään höyryverkossa ainoastaan kuormantasaukseen. Se kytketään yleensä välipaine- ja matalapaineverkkojen väliin. Höyryakun paine on välipaine- ja matalapaineverkkojen puolella välissä ja se on normaalisti puolillaan kylläistä vettä. Akkua ladataan johtamalla siihen välipainehöyryä, joka lauhtuu vedeksi ja aiheuttaa veden lämpötilan ja paineen nousun. Höyryä johdetaan akkuun, kunnes sen paine on välipaineverkon paineen tasolla. Akku puretaan avaamalla purkausventtiili, jolloin akun paine laskee ja kylläinen vesi sitoo itseensä energiaa höyrystyessään. Purkaminen päättyy, kun akun paine on sama kuin matalapaineverkon paine. Kuormantasauksessa käytettävällä höyryakulla saadaan talteen höyryn sisältämä energia ja lauhde. Turbiinin ohi menevä lataushöyrymäärä menetetään ja saatava sähköenergia hukataan. Höyryakun kannattavuus riippuu kuormitushäiriöiden suuruudesta sekä määrästä ja on arvioitava tapauskohtaisesti. (Joronen et al. 2007)

Lauhdevoimalaitoksissa turbiinin kautta kulkenut höyry lauhdutetaan vedeksi jäähdytysveden avulla lauhduttimessa. Lauhdutin sijaitsee voimalaitoksissa heti turbiinin jälkeen. Lauhduttimen lisääminen nostaa voimalaitoksen hyötysuhteen melkein kaksinkertaiseksi suoraan ulospuhallukseen verrattuna. Lauhduttimeen tulevan höyryn paine ja lämpötila eivät ole vakioita. Tämän takia on varmistettava riittävä jäähdytysvesivirta, jolloin höyry voidaan lauhduttaa alhaisempaan lämpötilaan. Näin saadaan lauhduttimen paine alhaisemmaksi ja saadaan höyry paisumaan pidempään turbiinissa. Höyryn tiivistyminen lauhteeksi aiheuttaa lauhduttimen tyhjän, jolloin höyryn ominaistilavuus muuttuu äkillisesti. Tyhjöä voidaan ylläpitää poistamalla lauhduttimesta ilmaa ja lauhtumattomia kaasuja höyrykäyttöisten ejektorien avulla.

Lauhduttimen suurella lämmönsiirtopinta-alalla päästään lähemmäksi jäähdyttävän veden lämpötilaa vastaavaa kylläisen höyryn painetta. (Holmström 1982)

Turbiinin toimintaolosuhteita ja voimalaitoksen hyötysuhdetta voidaan parantaa liittämällä prosessiin syöttöveden esilämmittimiä. Ne nostavat turbiinin väliottohöyryn avulla lauhduttimesta tulevan lauhteen lämpötilaa ennen kuin se johdetaan syöttöveden mukana kattilaan. Matalapaine-esilämmittimillä kuumennetaan lauhdevettä, joka pumpataan lauhdepumpuilla lauhduttimista muutaman baarin paineeseen. Kuumennukseen tarvittava höyry saadaan matalapaineturpiinin väliotoista. Kuumennuksessa tiivistynyt väliottohöyry pumpataan syöttöveden joukkoon. Vesi kulkee useiden matalapaine-esilämmitysvaiheiden jälkeen syöttövesisäiliöön, joka toimii yleensä yhtenä avoimena esilämmitysvaiheena. Höyry kulkee säiliössä oleviin putkiin ja sekoittuu suoraan kuumennettavaan veteen. Syöttövesipumppujen jälkeen olevia esilämmittimiä sanotaan korkeapaine-esilämmittimiksi, joihin saadaan höyry korkea- tai välipaineturpiinin väliotoista. (El-Wakil 1984, Holmström 1982)

3.8. Rikinhoistolaitos

Rikinhoistolaitoksessa puhdistetaan osa voimalaitoksen palamisprosessissa syntyvästä rikkidioksidista. Puhdistusprosessissa ruiskutetaan kalkkikivijauheen ja veden muodostamaa lietettä savukaasuihin. Rikkidioksidi ja kalkkikivi muodostavat reagoidessaan kalsiumsulfiittia sekä edelleen hapettuneena kalsiumsulfaattia eli kipsiä. Osa tästä kerääntyy reaktorin pohjalle. Kalsiumsulfaatti erotetaan lietteestä sykloneilla ja kuivataan alipainesuodattimella. Suurimmat sallitut hetkelliset ja keskimääräiset pitoisuudet määräävät vuosittaiset tunnit, jolloin rikinhoistolaitos voidaan ohittaa. Kivihiilen laatu vaikuttaa rikinhoistolaitoksen toimintaan, koska eri hiililaaduilla savukaasun kosteus, savukaasujen kokonaismäärä, rikkidioksidin määrä sekä klooripitoisuus vaihtelevat. Prosessin toimintaa ohjataan kalkkikivilietteen sakeudella ja siinä olevan tuorekalkin määrällä sekä ruiskutettavan lietteen määrällä. Korkea sakeus nostaa kemikaalikustannuksia, lisää pumppauksen tarvetta ja aiheuttaa tukkeutumisvaaran. Liian pienellä sakeudella erotusaste jää pieneksi. Oikeiden ohjausmuutosten tekeminen on vaikeata, koska muutokset puhdistusprosessissa näkyvät vasta pitkän viiveen jälkeen. (Majanne 2010)

Päästörajojen tiukkuuden vuoksi rikinhoistolaitoksella on erittäin suuri merkitys voimalaitoksen käyttötaloudelle. Prosessin toiminnan on oltava tehokasta, koska se kuluttaa yli puolet voimalaitoksen omakäyttötehosta. Kalkin syöttöä, lietteen valmistusta ja kalsiumsulfaatin suodatusta on valvottava tarkkaan. Häiriöihin ja ongelmiin on osattava varautua ja kunnossapitotoimenpiteillä minimoida laitoksen seisokkiaika. (Majanne 2010)

4. POLTTOAINEIDEN MERKITYS ENERGIATEHOKKUUTEEN

4.1. Polttoaineet

Polttoaineilla ja niiden ominaisuuksilla on suuri merkitys voimalaitosten energiatehokkuudessa. Polttoaineilla tuotetaan energia veden höyrystämiseen höyrykattiloissa. Ne voidaan jakaa kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin. Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan polttoöljyä ja kiinteitä polttoaineita.

4.1.1. Polttoöljy

Polttoöljyt jaetaan kevyisiin ja raskaisiin öljyihin niiden käyttöominaisuuksien perusteella. Kevyiden ja raskaiden polttoöljyjen ominaisuudet riippuvat valmistusprosessista. Huoneenlämpötilassa raskaat polttoöljyt ovat jäykkiä nesteitä. Öljyjen luokittelu perustuu viskositeettiin, koska jäykkyys on niiden tärkein käyttöominaisuus. Polttoöljyjen kemiallinen rakenne koostuu suuresta määrästä erilaisia hiilivetyjä, joiden ominaisuuksia ovat mm. tislautuvuus, tiheys, asfalteenipitoisuus ja hiiltojäännös. Kolloidisia seoksia olevat raskaat polttoöljyt koostuvat hiilivetyjen muodostamista nestefaasista, johon on sekoittuneena asfalteeneista ja harteista muodostuneita misellejä. Misellit muodostavat liekissä hitaasti palavia koksipartikkeleja. Koksen muodostumisnopeutta kuvaa öljyn hiiltojäännös. Raskas polttoöljy sisältää myös rikkiä, typpeä, happea, orgaanisesti sitoutuneita metalleja ja liukenemattomia epäorgaanisia suoloja. Pääasiassa metallioksidoista koostuva öljyn tuhka saattaa aiheuttaa polttoprosessissa pintojen likaantumista ja kuonaantumista. (Raiko et al. 2002)

4.1.2. Kiinteät polttoaineet

Kiinteät polttoaineet jaetaan fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin. Fossiilisia ovat kivihiili sekä turve ja uusiutuvia ovat maa- ja metsätalouden biomassapohjaiset polttoaineet esimerkiksi puu, olki, metsätähteet jne. Hiiltymisaste ja petrografinen koostumus kuvaavat kivihiilen ominaisuuksia. Kivihiili on geologisessa prosessissa ”hiiltynyttä” turvetta. Maatunutta kasviainesta olevan turpeen ominaisuuksia kuvaavat maatumisaste sekä kasvilajikoostumus. Yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta kutsutaan kierrätyspolttoaineeksi. Sen ominaisuudet vaihtelevat paljon, koska se

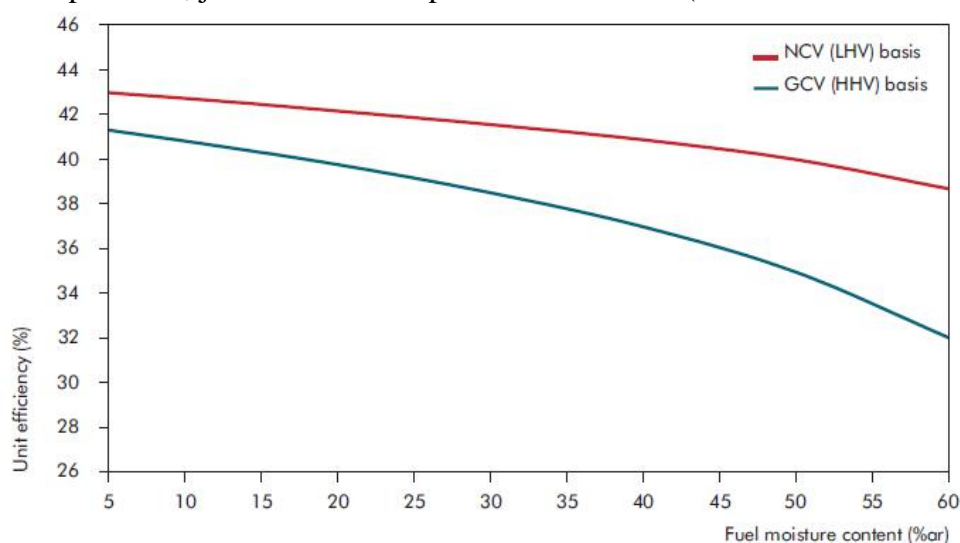
koostuu erityyppisistä jättemateriaaleista. Polttoaineet ovat fysikaaliselta ja kemialliselta rakenteeltaan epähomogeenisia, eikä niiden rakennetta tunneta yksikäsitteisesti. Niiden ominaisuudet määritetään sovituin ja standardoiduin menetelmin. (Raiko et al. 2002)

Puuperäisiä polttoaineita käytetään paljon leijukattiloiden polttoaineena. Puu on uusiutuva ja ympäristöystävällinen polttoaine. Metsähaketta poltettaessa syntyvä puutuhka voi aiheuttaa likaantumis- ja kuumakorroosio-ongelmia kattiloiden lämpö- ja tulistinpinoille. Rikkipäästö on pelkkää puuperäistä polttoainetta poltettaessa matala. Alkali- ja klooripitoisuudet ovat puuperäisissä polttoaineissa alhaisia, mutta ne kaasuuntuvat helposti polttoprosessissa ja muodostavat sulfaatteja sekä klorideja. Nämä suolat muodostavat kerrostumia kattilan lämpöpinnoille ja aiheuttavat kuumakorroosioriskin. Tämän takia puuperäisiä polttoaineita käytetään yhdessä muiden polttoaineiden kanssa. Tyypillisiä seoksia ovat turve-hake, kuori-hake, erityyppisten lietteiden ja hakkeiden seokset sekä näiden kaikkien yhdistelmät. Suosituksena on, että polttoaineseokseen lisätään 10 – 30 % turvetta tai muuta rikkipitoista polttoainetta kuten kivihiiltä. (VTT 2003)

4.2. Polttoaineiden ominaisuudet

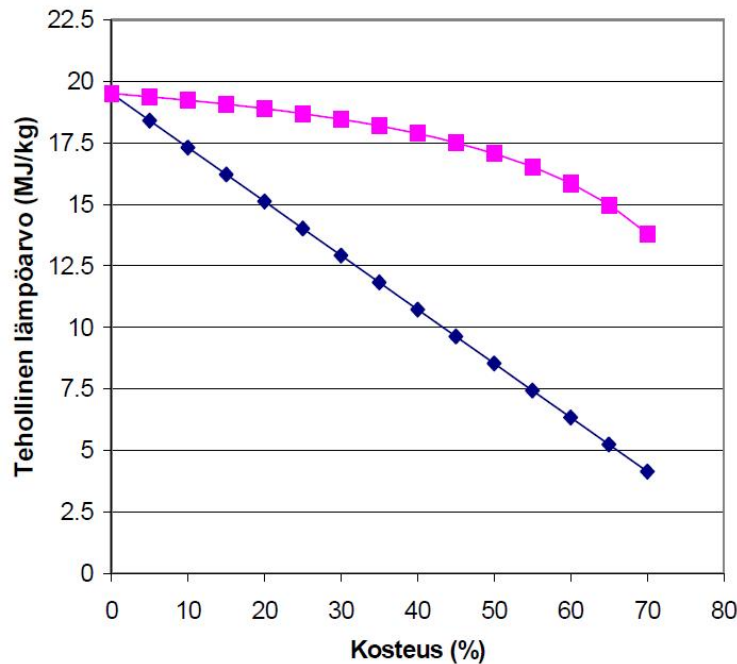
Kosteus on yksi merkittävimmistä polttoaineiden ominaisuuksista, koska sillä on suora vaikutus polttoaineen teholliseen lämpöarvoon eli tavanomaisessa poltossa vapautuvaan lämpöenergiaan. Muitamerkittäviä ominaisuuksia ovat polttoaineen lämpöarvo, irtotiheys ja palakoko. (Raiko et al. 2002)

Polttoaineen kosteudella on vaikutus palamiskäyttäytymiseen. Runsas kosteuspitoisuus jähdyttää leijutekniikassa petialuetta, jolloin osa palamisesta siirtyy kattilassa ylöspäin ja aiheuttaa ongelmia lämpötilan hallinnassa. Ongelma lisää typen oksideja. Siihen voidaan vaikuttaa lisäämällä muita polttoainekomponentteja kompensoimaan kosteutta. Pienillä kuormilla voidaan käyttää apuna öljy- tai kaasupolttimia, jotka auttavat lämpötilan hallinnassa. (Makkonen et al. 2000)



Kuva 4.1: Kivihiilen kosteuden vaikutus laitoksen hyötysuhteeseen alemman ja ylemmän lämpöarvon mukaan (IEA 2010).

Kuvasta 4.1 nähdään hyötysuhteen aleneminen kostealla kivihiilellä. Biopolttoaineilla tehollinen lämpöarvo huononee korkealla kosteuspitoisuudella erittäin merkittävästi, joka on havaittavissa kuvasta 4.2. Kosteuden merkityksestä on kerrottu lisää polttoaineen kuivauksen yhteydessä kohdassa 4.3.



Kuva 4.2: Biopolttoaineen kosteuden vaikutus teholliseen lämpöarvoon. Kuvaajassa on merkitty sinisellä tehollinen lämpöarvo kokonaismassaa kohden ja vaaleanpunaisella kuivamassaa kohden (Ahtila 2012).

Polttoaineen lämpöarvo voidaan ilmoittaa joko kalorimetrisenä (ylempi lämpöarvo) tai tehollisella lämpöarvona (alempi lämpöarvo). Kalorimetrisessä lämpöarvossa palamisen seurauksena syntynyt vesi on nestefaasissa ja tehollisessa lämpöarvossa höyryfaasissa. Kalorimetrisen lämpöarvo on nesteen höyrystymiseen tarvittavan energiamäärän suurempi kuin tehollinen lämpöarvo. Polttoaineen kuiva-aineen kalorimetrisen lämpöarvo voidaan määrittää tekemällä mittaus pommikalorimetrissä vakiotilavuudessa ja huoneen lämpötilassa. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo määritetään vähentämällä kalorimetrisestä lämpöarvosta polttoaineen vedyn palaessa syntyvän veden faasimuutoksen vaikutus kaavan 4.1 mukaan.

$$q_i = q_s - 219,6 \cdot H \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.1)$$

missä q_i on kalorimetrisen lämpöarvo, q_s on tehollinen lämpöarvo ja H vedyn määrä paino- %:na kuivasta-aineesta. Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo q_{iw} voidaan laskea kaavalla 4.2. Kaavassa w kuvaa polttoaineen kosteuspitoisuutta paino- %:na.

$$q_{iw} = q_i \cdot (100 - w) / 100 - 24,43 \cdot w \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.2)$$

Polttoaineen sisältämä happi voi muodostaa erilaisia yhdisteitä polttoaineen palavien komponenttien kanssa. Tämä aiheuttaa useita korrelaatioita lämpöarvon laskemiseen, joiden tulokset vaihtelevat paljon. Kivihiilen lämpöarvo (29 MJ/kg) on selkeästi korkeampi kuin biopolttoaineiden (noin 20 MJ/kg) tai turpeen (22 MJ/kg). Korkeimmat lämpöarvot ovat maakaasulla ja polttoöljyllä. (Raiko et al. 2002, Ahtila 2012)

Polttoaineen palakoko vaikuttaa voimakkaasti palamiskäyttäytymiseen. Suurikokoiset, tiheet kappaleet palavat hitaasti, jolloin vaaditaan suuri viipymäaika palamisvyöhykkeellä. Pienikokoiset, kevyet polttoainehiukkaset voivat helposti kulkeutua palamisilman mukana tulipesän palamisvyöhykkeeltä pois, aiheuttaen jälkipalamista. Tämä puolestaan aiheuttaa päästöjen kasvamista. Lisäksi on mahdollista, että palamatonta hiiltä kulkeutuu lentotuhkan joukkoon, jolloin kattilan palamishyötysuhde alenee. Suuri polttoaineen palakoko ja epätasainen polttoaineen syöttö näkyy yleensä savukaasun CO – pitoisuuden kasvuna. Leijupoltossa polttoaineen palakoolle ei aseteta yhtä suuria vaatimuksia kuin pölypoltossa. (Makkonen et al. 2000)

4.3. Polttoaineiden kuivatus

Fossiilisia polttoaineita on alettu korvaamaan biopolttoaineilla päästörajoitusten ja polttoaineiden kallistumisen seurauksena. Biopolttoaineilla on huonompi lämpöarvo kuin fossiilisilla polttoaineilla, minkä takia biopolttoaineiden massavirran on oltava suurempi. Polttoaineiden kuivatus on hyvä menetelmä parantaa polttoaineen lämpöarvoa. (Holmberg et al. 2000)

Leijukerroskattilat mahdollistavat erittäin kosteiden (kosteuspitoisuus jopa 70 paino- %) polttoaineiden polttamisen. Parhaaseen lopputulokseen polttoprosessin kannalta päästään alle 30 paino- % kosteuspitoisuudella. Biopolttoaineiden kuivatuksesta saatavat hyödyt ovat:

- kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo paranee
- kattilan hyötysuhde nousee
- adiaapaattinen palamislämpötila nousee
- päästöt vähenevät
- polttoaineiden laatuvaihtelut pienenevät

Tehollisen lämpöarvon kasvaessa saadaan pienemmällä polttoaineen määrällä sama polttoaineteho kuin käytettäessä kosteaa polttoainetta. Korkeampi tehollinen lämpöarvo parantaa kattilan hyötysuhdetta, koska savukaasujen kastepistelämpötila alenee. Tämä aiheutuu vesihöyryn osapaineen pienenemisestä savukaasuissa. Hyötysuhde paranee, koska voidaan laskea savukaasujen loppulämpötilaa ja samalla polttoaineteholla savukaasumäärä pienenee. Adiaapaattinen palamislämpötila nousee, koska polttoaineessa on vähemmän vettä haihdutettavana ja korkeamman tehollisen lämpöarvon takia tarvitaan vähemmän yli-ilmaa. Savukaasujen määrä vähenee yli-ilmamäärän verran. Energiantuotannon päästöt vähenevät kuivatuksen vaikutuksesta, koska polttoainetta kuluu vähemmän ja korkeampi adiaapaattinen palamislämpötila mahdollistaa

täydellisemmän palamisen. Päästöjen aleneminen korostuu, mikäli korkeamman tehollisen lämpöarvon seurauksena pystytään korvaamaan fossiilisia polttoaineita biopolttoaineilla. Tällä on erittäin suuri merkitys hiilidioksidipäästöihin. Kattilan pikeentymistä, nokipalovaaraa savukaasuhormissa sekä vesihöyryn aiheuttamaa kattilan syöpymistä voidaan myös vähentää biopolttoaineiden kuivauksella. (Holmberg et al. 2000)

4.4. Lämpöpintojen likaantuminen

Lämpöpintojen likaantuminen aiheuttaa eniten ennakoimattomia kattiloiden alasajoja. Likaantumista aiheuttavat polton yhteydessä muodostuvat tuhka ja polttoaineen palamaton epäorgaaninen jäännös. Polttoaine ja polttotekniikat vaikuttavat tuhkan muodostumiseen. Tuhka aiheuttaa kahdentyyppisiä likaantumisongelmia: kuonaantumista (slagging) ja likaantumista (fouling). Kuonaantumisessa tulipesän säteilyalueelle kertyy paksuja ja ulkopinnaltaan sulaneita kerroksia. Likaantumisessa kiinteässä muodossa ja alhaisessa lämpötilassa oleva tuhkakerrostuma kerääntyy kattilan konvektio-osiin. (Raiko et al. 2002)

Tuhkapartikkelien sulamistaipumus on vähäistä leijukerros poltossa alhaisen tulipesälämpötilan takia ja pölypolttoon verrattuna höyrystyneiden tuhkaa muodostavien ainesosien määrä on pienempi. Leijukerros poltossa suurimmat ongelmat aiheuttavat tuhkan ja leijutusmateriaalin väliset agglomeraatit. Ne voivat aiheuttaa kattilan alasajon ja agglomeroitumista voidaan estää riittävän usein suoritettavalla leijutusmateriaalin vaihdolla. Näin saadaan pidettyä tuhkapitoisuus leijutusmateriaalin verrattuna pienenä. (Raiko et al. 2002)

Lämpöpintojen likaantumiseen aiheuttaa lämmönsiirtimen lämmönläpäisykertoimen huononemista, savukaasu- ja vesikierron painehäviöiden kasvua sekä savukaasujen loppulämpötilan nousua. Kattilan likaantumiseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi: oikea-aikaisella nuohouksella, palamisen hallinnalla sekä polttoaineiden ja niiden seosten valinnalla. (Raiko et al. 2002)

4.4.1. Lämmönsiirto

Lämmönsiirrin siirtää lämpöä kahden eri lämpötiloissa olevan aineen välillä. Lämmönsiirtimet luokitellaan niiden toimintaperiaatteen perusteella myötä-, vasta- ja ristivirtalämmönsiirtimiin. Kylmä ja kuuma aine virtaavat myötävirtalämmönsiirtimissä samaan suuntaan. Vastavirtalämmönsiirtimissä aineet virtaavat vastakkaisiin suuntiin. Ristivirtalämmönsiirtimessä aineet virtaavat kohtisuoraan toisiaan vastaan. (Mills 1999)

Lämmönsiirtimessä siirtyvä lämpöteho ϕ voidaan määrittää kuumen ja kylmän aineen lämpötilaerojen avulla. Tällöin

$$\phi = kA\Delta T_m \quad (4.3)$$

Missä k on lämmönläpäisykerroin, A on lämmönsiirtopinta-ala, F on ristivirtalämmönsiirtimen korjauskerroin ja ΔT_m on logatirminen keskilämpötilaero.

Logaritminen keskilämpötilaero vastaa paremmin lämmönsiirtotilannetta kuin aritmeettinen keskilämpötilaero.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (4.4)$$

Missä ΔT_1 on lämmönsiirtotilanteesta riippuva lämpötilaero, ΔT_2 on lämmönsiirtotilanteesta riippuva lämpötilaero ja ΔT_m on logatirminen keskilämpötilaero.

Lämmönsiirtoa ainevirtojen välillä kuvataan lämmönläpäisykertoimella k . Lämpö voi siirtyä johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä. Lämmönsiirtokerroin k voidaan määrittää kylmän (c) ja kuuman (h) aineen välillä seuraavasti:

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{(a_t A)_c} + R_{cond} + \frac{1}{(a_t A)_h} \quad (4.5)$$

Missä k on lämmönläpäisykerroin, A on lämmönsiirtopinta-ala, a_t on konvektiivisen ja säteilylämmönsiirtokertoimen summa ja R_{cond} on johtumista vastaava lämpövastus.

Levyille tai ohutseinäiselle putkelle voidaan johtumisen lämpövastus R_{cond} laskea kaavalla (4.6), sekä paksuseinäiselle putkelle kaavalla (4.7)

$$R_{cond} = \frac{L}{\lambda A} \quad (4.6)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_0/r_1)}{2\pi L\lambda} \quad (4.7)$$

Missä R_{cond} on lämpövastus, L on levyn paksuus, A on lämmönsiirtopinta-ala, r_0 on putken sisäsäde, r_1 on putken ulkosäde ja λ on lämmönjohtavuus.

Lämmönsiirtopintojen likaantumisen vaikutus lämmönläpäisykertoimeen voidaan määrittää kaavalla 4.8.

$$\frac{1}{k_f A} = \frac{1}{kA} + \frac{R''_{f,c}}{A_c} + \frac{R''_{f,h}}{A_h} \quad (4.8)$$

Missä k on puhtaan lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin, k_f on likaantuneen lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin, A on lämmönsiirtopinta-ala kylmälle (c) ja kuumalle (h) puolelle ja R''_f on likaantumistekijä kylmälle (c) ja kuumalle (h) puolelle (Mills 1999)

4.4.2. Painehäviö

Putkessa virtaavan aineen painehäviö aiheutuu kitkan vaikutuksesta. Bernoullin lain mukaan se on verrannollinen virtaavan aineen nopeuden neliöön. Myös kertavastukset aiheuttavat painehäviötä. Kertavastuksia ovat putkessa olevat mutkat, pyöristykset, kavennukset ja levennykset. Kaasun tai nesteen kokonaispainehäviö Δp voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta p = \left(\xi \frac{L}{D} + \sum \zeta \right) \frac{\rho w^2}{2} \quad (4.9)$$

Missä Δp on painehäviö, ξ on kitkakerroin, L on putken pituus, D on putken halkaisija, ζ on kertavastusten summa, ρ on virtaavan aineen tiheys ja w on virtaavan aineen nopeus. Höyrykattilan vesipuolella tapahtuva painehäviön kasvu kertoo huollon ja puhdistuksen tarpeesta. Kerrostumat, jotka kerääntyvät putkien sisälle voivat aiheuttaa kemiallisen syöpmisen, korroosiota sekä ylikuumenemista.

Savukaasupuolen painehäviön laskennassa huomioidaan myös esilämmitin- tai tulistinputkien aiheuttamat painehäviöt. Savukaasujen painehäviö voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta p = N_L \chi \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (4.10)$$

Missä Δp on painehäviö, ξ on kitkakerroin, N_L on putkirivien lukumäärä, χ on korjauskerroin, ρ on savukaasun tiheys ja w on savukaasun virtausnopeus.

Savukaasupuolen painehäviön noustessa savukaasukanava on likaantunut tai kuonaantunut. Painehäviön seurauksena voidaan määrittää huollon tarve sekä nuohouksen määrä. (Stultz et al. 1992)

5. VOIMALAITOKSEN ENERGIATEHOKKUUDEN VALVONTA

Voimalaitoksen energiatalouden optimoinnin päätavoite on polttoaineen energiasisällön mahdollisimman hyvä hyödyntäminen. Voimalaitoksen kokonaishyötysuhde kuvaa sitä, miten tehokkaasti polttoaineen energia muutetaan sähköksi ja lämmöksi. Tässä kappaleessa käydään läpi, mihin polttoaine-energia kuluu voimalaitoksissa ja miten sitä olisi mahdollista hyödyntää paremmin.

5.1. Kokonaishyötysuhde

Sähkön hinta määräytyy Suomessa vapaan kilpailun perusteella. Suomi on osa yhteispohjoismaista sähkömarkkinaa, joka ohjaa myös energiantuotantoa. Pohjoismainen vesivoimatuotanto säätelee Suomessa hiilellä tuotetun lauhdesähkön tuotantoa. Sähköntuotannon tavoite on sähkön tuottaminen kilpailukykyiseen hintaan huomioiden ympäristö- ja turvallisuusvaatimukset. Hyötysuhde on pidettävä käytön aikana mahdollisimman korkeana, päästöt on pystyttävä pitämään annetuissa rajoissa sekä käyttö- ja kunnossapidolla varmistettava laitoksen hyvä käytettävyys. (Joronen et al. 2007)

Prosessiarvoja pyritään pitämään mahdollisuuksien mukaan lähellä suunnitteluarvoja, jotta saavutetaan mahdollisimman korkea hyötysuhde ja vältetään laitteiden vikaantuminen. Voimalaitoksen prosessihyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat: tuorehöyryn lämpötila ja paine, välitulistushöyryn lämpötila, välipaineruiskutusveden määrä, lauhduttimen paine, kaukolämpöveden paluu- ja menolämpötila, syöttöveden lämpötila, painehäviöt pääprosessissa ja osakuorma-ajo. Höyryturbiiniprosessin hyötysuhde pienenee pienillä tehoalueilla.

Tuorehöyryn lämpötilan laskeminen 530 °C:sta 520 °C:een alentaa voimalaitoksen hyötysuhdetta noin 1,1 %. Vastaava muutos välitulistushöyryn lämpötilassa aiheuttaa noin 0,8 % hyötysuhteen heikentymisen.

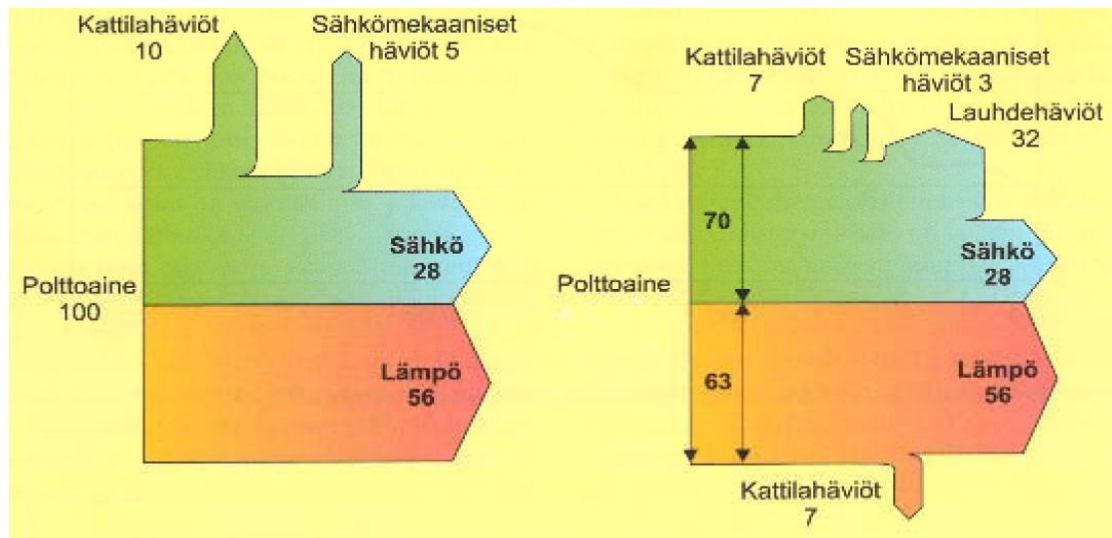
Jäähdytysvesivirtauksen lisääminen alentaa lauhduttimen painetta. Tämä parantaa prosessihyötysuhdetta, koska höyryturbiinin paisunta jatkuu pidempään. Jäähdytysvesivirtauksen lisäys nostaa omakäyttötehon määrää, koska pumpputyön määrä lisääntyy. Voimalaitoksen sähköntuotannon optimoinnissa voidaan määrittää tietyn tehotason ja jäähdytysvesimäärän mukaan paras mahdollinen paine lauhduttimessa. (Raiko, M. et al. 1991, Huhtinen et al. 2011)

Kokonaishyötysuhde voidaan määrittää voima- ja lämpölaitoksille kaavalla (5.1)

$$\eta_{kok} = \frac{P_e + Q_{kl} + Q_{pl}}{Q_p} \quad (5.1)$$

Missä P_e on tuotettu nettosähköteho, Q_{kl} on tuotettu kaukolämpöteho, Q_{pl} on tuotettu prosessilämpöteho ja Q_p on polttoaineteho. Lauhdelaiteksella kaava supistuu nettosähkötehon ja käytetyn polttoaineen suhteeksi. (VTT Energia 2004)

Höyryturbiiniprosessissa häviötehona menetetään lauhduttimen teho, koska loppu kattilatehosta menee lauhduttimen kautta jäähdytysveden mukana ympäristöön. Energiantuotannon hyötysuhdetta pystytään parantamaan sähkön ja lämmön yhteistuotannolla. Kaukolämpö- ja prosessihöyryn tuotanto hyödyntää osan lauhduttimen häviöstä lämpöenergiana. Molemmille tuotteille on oltava samanaikainen tarve tai oltava mahdollisuus varastoida tuotteita. Sähkönsiirrossa etäisyydet eivät aiheuta ongelmia, kun taas lämmön siirtäminen pitkien etäisyyksien päähän ei ole kannattavaa. Lämmöntarve määrää usein tuotantopaikan. Lämpöä pystytään varastoimaan helpommin kuin sähköä, mikä mahdollistaa tuotannon ohjauksen liikkumavaran. Kuvassa 5.1 on esitetty yhteistuotannon (sähkö ja lämpö) ja erillistuotannon Sankey-kaaviot sekä niiden energiavirrat. Yhteistuotannon kokonaishyötysuhde (85 %) on selkeästi korkeampi kuin erillistuotannon (40 %). (Joronen et al. 2007, Raiko, M. et al. 1991, VTT Energia 2004)



Kuva 5.1: Lauhde- ja CHP-voimalaitoksen energiavirrat (VTT Energia 2004)

Voimalaitoksen hyötysuhde vaikuttaa polttoaineenkäytön lisäksi päästöihin. (VTT Energia 2004)

Kulutussuhteella voidaan määrittää tarvittava polttoainemäärä yhtä verkkoon syötettyä MWh:a kohden. Kulutussuhde on hyötysuhteen käänteisluku. Se voidaan määrittää erikseen sähkölle ja lämmölle. Sähkön kulutussuhde on korkeampi kuin lämmön. Tämä aiheutuu siitä, että sähkön tekemiseen kohdistuu enemmän häviöitä kuin lämmön tekemiseen. (Raiko, M. et al. 1991)

5.2. Kattilahyötysuhde

Standardin SFS-EN 12952–15 perusteella kattilan hyötysuhde määritetään seuraavasti:

$$\eta_k = \frac{\Phi_{\text{hyöty}}}{\Phi_{\text{sisään}}} \quad (5.2)$$

Sijoittamalla kaavaan 5.2 seuraava lauseke

$$\Phi_{\text{hyöty}} = \Phi_{\text{sisään}} - \Phi_{\text{häviöt}} \quad (5.3)$$

Saadaan kattilan hyötysuhde laskettua suoralla menetelmällä:

$$\eta_k = 1 - \frac{\Phi_{\text{häviöt}}}{\Phi_{\text{sisään}}} \quad (5.4)$$

Josta edelleen voidaan johtaa kattilan hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä:

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \Phi_{\text{häviöt}} / \Phi_{\text{hyöty}}} \quad (5.5)$$

Suora menetelmä kaava 5.4 on käyttökelpoinen, mikäli polttoaineen lämpöarvo ja massavirta on tarkasti mitattavissa. Lämpöarvon vaikutuksesta ja määrittämisestä on kerrottu kappaleessa 4.2. Suorassa menetelmässä mitataan kattilassa veteen ja höyryyn sitoutunut lämpömäärä ja polttoaineessa kattilaan viety lämpömäärä. Käytännössä tarkat polttoainemittaukset pystytään tekemään vain maakaasu- ja öljykattiloilla. Kun halutaan määrittää yksityiskohtaisemmin häviöiden suuruus, voidaan kattilan hyötysuhde laskea epäsuoralla menetelmällä kaavalla 5.5. Epäsuoraa menetelmää käytetään kiinteitä polttoaineita polttavien kattiloiden hyötysuhteen määrittämisessä. Käytettävällä polttoaineella on suuri merkitys kattilahyötysuhteeseen. (Anon. 2003)

5.2.1. Ulkoilman olosuhteet

Ulkoilman lämpötilalla on vaikutus kattilahyötysuhteeseen. Lämpötila lisää vesihöyryn määrää, jolla on taas merkitys savukaasun loppulämpötilaan. Ulkoilman lämpötilan muutokset vaikuttavat kattilan palamisilman lämpötilaan, kattilan säteilyhäviöihin ja puhallintehoon. Kattilan häviöiden väheneminen ulkoilman lämpötilan noustessa huonontaa toisaalta jäähdytysjärjestelmän suorituskykyä. Ulkoilman lämpötilan nouseminen 10 asteella vähentää 0,5 % polttoainetta, saman palamisilman lämpötilan saavuttamiseksi kattilassa. (IEA 2010)

5.3. Kattilahäviöt

Höyrykattilan hyötysuhteeseen vaikuttavia häviöitä ovat savukaasuhäviö, palamattoman polttoaineen häviöt, säteily- ja johtumishäviöt, omakäyttöhäviö (apuhöyry, hajotushöyry, nuohoushöyry), tuhkan ja kuonan fysikaalinen lämpö ja ulospuhallushäviö.

Säteily – ja johtumishäviöihin ei voida käytännössä vaikuttaa, koska niiden vähentäminen vaatii kattilan eristekerroksen lisäämistä. Kattilarakennuksen vuodot, palamisilman otto paikka ja ulkoilman lämpötila vaikuttavat myös säteily – ja johtumishäviöiden suuruuteen. Niiden määrä on absoluuttinen, jonka takia suhteellinen osuus kasvaa osakuormilla. (Raiko, M. et al. 1991)

Kaasujen ja veden lämpömäärät ovat riippuvaisia lämpötilasta. Lämpötaseen määrittämisessä valitaan referenssilämpötila 0 °C tai 20 °C. Kattilahyötysuhteeseen vaikuttavat useat eri tekijät, minkä vuoksi se vaihtelee välillä 60 – 95 %. Suurilla poltinlämmitteisillä kattiloilla on yleensä paras hyötysuhde ja huonoimmat pienillä arinalämmitteisillä kattiloilla. (Raiko, M. et al. 1991)

5.3.1. Savukaasuhäviö

Savukaasuhäviö aiheutuu, kun savukaasut joudutaan johtamaan savupiippuun ympäristön lämpötilaa kuumempina. Siitä aiheutuu höyrykattiloiden merkittävin häviö ja sen osuus kattilan häviöistä on noin 70 – 80 %. Savukaasujen loppulämpötila, savukaasun määrä ja polttoaineen kosteuspitoisuus vaikuttavat savukaasuhäviön suuruuteen. Ne on mitattava mahdollisimman tarkasti, jotta savukaasuhäviö pystytään määrittämään luotettavasti. Polttoaineen kosteuden nousu 60 prosentista 65 prosenttiin lisää savukaasuhäviötä noin 10 %, koska polttoaineessa ollut vesi poistuu höyrynä savukaasujen mukana. Kyseinen kosteuden lisääntyminen aiheuttaa kattilahyötysuhteen määrittämisessä noin 1,5 – 2,0 % muutoksen. Savukaasuhäviöiden osuus on noin 5 – 10 % polttoainetehosta. Polttoaineen laatu (kosteus, kuiva-aineanalyysi), yli-ilmamäärä (O₂-pitoisuus), luvon vuoto ja low-NO_x-polttotapa vaikuttavat savukaasun määrään. Savukaasuhäviöiden muodostuminen voidaan laskea kaavalla 5.6. (Holmberg et al. 2000, Raiko, M. et al. 1991, Anon. 2003)

$$Q_g = c_{pg} * M_g * (T_g - T_{ref}) \quad (5.6)$$

missä Q_g on savukaasuhäviö, M_g on savukaasun massavirta luvon jälkeen, c_{pg} on savukaasun ominaislämpö, T_g on savukaasun lämpötila, T_{ref} on referenssilämpötila.

Savukaasujen loppulämpötilan muutos 120 asteesta 130 asteeseen huonontaa voimalaitoksen hyötysuhdetta 0,5 – 1,0 %, koska kattilan lämpöteho huononee. Savukaasuista saadaan enemmän lämpötehoa, kun voidaan laskea savukaasujen loppulämpötilaa. Rajana on kastepistelämpötila, jota ei saa alittaa. Höyryluvolla voidaan nostaa savukaasujen lämpötilaa. Savukaasujen loppulämpötilaan vaikuttavat:

- Luvon vuoto

- Savukaasujen kierrätys
- Kattilan likaisuus
- Palamisilman lämpötila
- Syöttöveden lämpötila
- Myllyilmat
- Tehotaso

Tärkein palamisolosuhteita kuvaava mittari on savukaasujen O_2 -pitoisuus. Happipitoisuuden pitäminen optimiarvossaan on erittäin tärkeää, jotta mahdollistetaan hyvä palaminen ja säästetään polttoainetta. Suuri O_2 -pitoisuus kasvattaa savukaasuhäviötä ja pieni O_2 -pitoisuus aiheuttaa epätäydellistä palamista. O_2 -pitoisuuden nosto lisää NO_x -päästöjä ja pienentää CO-päästöjä. O_2 -pitoisuus reagoi nopeasti polttoprosessissa tapahtuviin häiriöihin. Savukaasujen happipitoisuuden aleneminen 4,0 prosentista 3,5 prosenttiin laskee hiilikattiloiden polttoaineen kulutusta 1,1 prosenttia. (Joronen et al. 2007, Zeitz 1997)

5.3.2. Palamattomien polttoaineiden häviöt

Palamattomien polttoaineiden häviöt syntyvät polttoaineen epätäydellisestä palamisesta. Niiden vaikutus kattilahyötysuhteeseen on tavallisesti melko pieni ja niitä on helppo valvoa mittausten avulla. Leijukerros poltossa palamattomia syntyy enemmän kuin pölypoltossa, missä polttoaineesta jää parhaimmassakin tapauksessa noin 0,5 % palamatta. Palamaton polttoaine koostuu tuhkan sekaan jäävästä jäännöskoksista, hiilimonoksidista (CO) ja erilaisista hiilivedyistä (C_xH_y). Polttoprosessissa pyritään siihen, että happipitoisuus (O_2) olisi mahdollisimman pieni ja palamattomia ei syntyisi. Palamattoman polttoaineen määrään vaikuttavat:

- polttoaineen huono jauhautuvuus
- riittämätön palamisilmamäärä
- kostea polttoaine
- huono polttolaitekonstruktio
- kattilan kuorman vaihtelut
- low- NO_x -polttotapa

Palamistehokkuuteen voidaan vaikuttaa optimoimalla sekundääri-ilman määrää sekä sekundääri-ilman ja polttoaineen syöttöpisteiden sijaintia. Palamistehokkuutta voidaan optimoida myös pidentämällä viipymäaikaa ja parantamalla sekoittumista. Epätäydellisen palamisen seurauksena hyötysuhde pienenee, kattila likaantuu ja ympäristöön leviää savukaasujen välityksellä haitallisia kaasuja. Palamattomien polttoaineiden yhdisteet lisäävät myös tulipesän korroosiota. (Raiko, M. et al. 1991, Raiko et al. 2002)

Palamattomien häviö voidaan määrittää kiinteissä polttoaineissa mitatun tuhkamäärän m_T ja tuhkasta analysoidun tehollisen lämpöarvon H_{uT} avulla.

$$h_p = m_T * H_{uT} / (m_B * H_u) \quad (5.7)$$

missä m_T on tuhkavirta, H_{uT} on tuhkan tehollinen lämpöarvo, m_B on polttoainevirta ja H_u on polttoaineen tehollinen lämpöarvo. Palamattomien h_p osuuden nousu 3 %:n tavoitearvosta 8 %:iin huonontaa voimalaitoksen hyötysuhdetta 0,3...0,5 %. (Raiko, M. et al. 1991)

Tuhkahäviötä aiheuttavat savukaasujen mukana poistuva lentotuhka ja tulipesän pohjatuhka. Lentotuhkan osuus kattilasta poistuvasta tuhkasta on suuri pölypoltossa ja sen lämpötila on sama kuin savukaasuilla noin 1000 °C. Tuhkahäviön osuus on yleensä luokkaa 0,05 – 0,1 %, joten sen merkitys on varsin pieni kattilahyötysuhteeseen. (Raiko, M. et al. 1991)

CO-häviö aiheutuu hiilen epätäydellisen palamisen seurauksena. Käytettäessä liian pientä ilmakerrointa tai polttimien häiriöiden yhteydessä, saattaa CO-pitoisuus savukaasuissa nousta merkittäväksi. Leijukerros-poltossa CO-pitoisuus nousee, kun palaminen tapahtuu matalassa lämpötilassa. Kattilalle tulee hakea optimi ilmakerroin, jolla CO-pitoisuus on halutulla tasolla. CO-häviö aiheuttaa noin 2 – 4 % kattilan häviöistä. (Raiko, M. et al. 1991, Anon. 2003)

5.3.3. Nuohous

Voimalaitokset polttavat nykyään erilaisia polttoaineita, jotka aiheuttavat ongelmia kattilan lämpöpinnoille. Nuohouksella poistetaan kattilaan kertyneitä likakerroksia. Nuohous suoritetaan käytön aikana ja sen tarve riippuu kattilatyypistä sekä polttoaineesta. Nuohouksella parannetaan kattilan lämmönsiirto-ominaisuuksia ja hyötysuhdetta. Lämmönsiirron parantumisen seurauksena höyrynarvot saavutetaan paremmin ja savukaasujen loppulämpötila laskee. Likaantuneessa kattilassa omakäyttöteho kasvaa, koska lämpöpintoihin tarttunut lika kasvattaa savukaasun virtausta ja lisää puhaltimien tehoa. Vaikutus on huomattavissa selkeimmin tiheissä lämpöpinnoissa, kuten veden esilämmittimessä ja pyörivässä ilmanesilämmittimessä.

Nuohoukseen käytetään kattilan painehöyryä. Höyry sekoittuu savukaasuihin nuohouksessa ja jäähtyy niiden mukana. Osa nuohoushöyryn energiasta saadaan talteen. Nuohouksen kesto ja tiheys sekä nuohouksen vaikutukset kattilan toimintaan selittävät nuohouksen aiheuttamien häviöiden suuruuden. Voimalaitoksen hyötysuhde on nuohouksen aikana alhaisempi kuin nuohousten välissä, koska nuohoukseen tarvittava höyrymäärä on pois tuorehöyrystä. Tulistinalueen nuohous on erittäin tärkeää, koska tuhkakomponentit tarttuvat putkipintoihin ja alentavat kokonaislämmönsiirtoa. Myös muiden lämmönsiirtopintojen nuohous varmistaa tehokkaan lämmönsiirron ja parantaa hyötysuhdetta. Kiertopetikattiloissa liikkuva hiekka hoitaa tarvittavan puhtaanapidon ja tulipesän nuohoimia ei tarvita. Käytettäviä nuohointityyppejä ovat: puhallusnuohoimet, vesipesulaitteet, kuulanuohouslaitteet, mekaaniset ravistuslaitteet ja ääninuohoimet. (Huhtinen et al. 2000, Metso Automation 2012a, Huhtinen et al. 2011).

Nuohous on usein riittävää suorittaa kerran vuorossa, mutta väliä voidaan muuttaa käyttökokemusten perusteella (Huhtinen et al. 2011). Nuohous on tehtävä riittävän usein, jotta mahdollistetaan kattilan optimaalinen toiminta, mutta ylimääräistä nuohoamista on myös pystyttävä välttämään. Lämmönläpäisykerroin pysyy nuohouksen optimoinnilla tasaisen korkeana ja mahdollistaa hyvän lämmönsiirron kattilassa. (Metso Automation 2012a)

5.4. Turbiinilaitoksen energiatehokkuus

5.4.1. Turbiinihäviöt

Turbiinin häviöt voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin häviöihin. Höyryturbiini ei pysty hyödyntämään kaikkea paisuntatehoa tuorehöyrystä, koska osa teoreettisesta tehosta menetetään sisäisiin häviöihin. Sisäiset häviöt ovat pääasiassa virtaushäviöitä ja ne voidaan jakaa ryhmiin:

- Suutinhäviö
- Siivistöhäviö
 - Kitkahäviö
 - Sysäyshäviö
 - Pyörrehäviö
 - Suunnanmuutoshäviö
- Ulosvirtaushäviö
- Pyöräkitkahäviö ja tuuletushäviö
- Vuotohäviö

Virtausvastus suuttimessa aiheuttaa suutinhäviön, joka kasvaa kulumisen, kerrostumisen ja syöpymisen vaikutuksesta. Siivistöhäviötä aiheuttavat kitka- ja sysäyshäviö muodostuvat höyryn törmätessä siiven tuloreunaan sekä höyryn tulosuunnan ollessa siiven tangentin vastainen. Siiven pinnanlaatu ja leveys vaikuttavat kitkahäviön suuruuteen. Siiven reunan teroituksella saadaan pienennettyä sysäyshäviötä. Pyörrehäviötä aiheutuu siitä, että juoksupyörän siipikanava on pidempi kuin johtokanava. Tasapaksuilla levysiivillä varustetuissa kanavissa kanavan keskiosa on laajempi kuin sen reumat, mikä aiheuttaa myös pyörrehäviötä. Suunnanmuutoshäviö on suurin häviö ja se johtuu höyryn sisäisen virran aiheuttamasta kääntymisestä siipisolassa. Siivistöhäviötä syntyy ylipaineturbiinilla johtokanavassa ja juoksupyörän siivistössä.

Kun höyry poistuu juoksupyörästä, sillä on oltava tietty nopeus c_2 , joka vaihtelee välillä 100 – 250 m/s. Lauhdeturbiineilla on suuremmat nopeudet kuin vastapaineturbiineilla. Poistumisnopeutta ei saada hyödyksi monijaksoisen turbiinin alkuosassa, jossa osasyösteinen Curtis-jakso muuttuu täyssyöstöiseksi, koska höyryn liike muuttuu pyörteilyksi. Pieni välitys johtolaitteen ja juoksupyörän välillä parantaa reaktioturbiineissa edellisen jakson poistumisnopeudesta saatavaa hyötyä.

Reaktioturbiinit ovat täyssyöstöisiä, jonka takia poistumishäviö on niillä pienempi kuin aktioturbiineilla. Viimeisessä jaksossa poistumishäviö menetetään kaikissa turbiineissa.

Pyörivän siipilevyn ja höyryn välinen kitka aiheuttaa pyöräkitkahäviötä, jonka suuruus riippuu pyörimisnopeudesta, höyryn arvoista sekä pyörän halkaisijasta ja pinnasta. Osasyöstöisissä Curtis-jaksoissa ja määräsäädössä siipisolat vuoroin täyttyvät höyryllä ja tyhjenevät höyrystä, joka aiheuttaa tuuletushäviötä. Ylipaineturbiineissa ei ole tuuletushäviötä ja pyöräkitkahäviö on pieni, koska niissä ei ole siipilevyjä.

Höyryn vuotoa turbiinin sisällä nimitetään vuotohäviöksi, joka syntyy höyryn päästessä pienempipaineiseen jaksoon luovuttamatta energiaansa akselille. Vuotohäviötä lisäävät suuri vuotoraon pinta-ala, suuri paine-ero ja pieni höyryn ominaistilavuus. Korkeapaineosassa vuotohäviö on suuri, koska vuotopinta-ala kanavan poikkipintaan verrattuna on suuri ja ominaistilavuus on pieni. Tasapaineturbiinissa juoksupyörän tulo- ja menopuolella on sama paine sekä vuoto johtosiivistön ohi ja akselin sokkelotiivisteen halkaisija ovat pieniä, mistä johtuen myös vuotohäviö jää vähäiseksi. Siipien kärkisedivanteen ja rungon välissä voi todellisuudessa esiintyä haitallinen toisiovuoto, koska paine kasvaa säteen suunnassa. Juoksupyörän tulo- ja jättöreunan välinen paine-ero sekä vuoto johtosiivistön ohi aiheuttavat ylipaineturbiineilla suuremman vuotohäviön. Turbiinin matalapaineosaan mentäessä vuotohäviö pienenee, koska paine-ero pienenee ja vuotopinta-ala on pidempien siipien takia suhteessa pienempi.

Turbiinin sisäiset häviöt nostavat seuraavan jakson lämpösisältöä, koska höyryyn jää enemmän energiaa kuin teoreettinen arvo edellyttäisi. Tämä energia saadaan osittain hyödynnettyä ja sitä kutsutaan takaisinvoitoksi. Teoreettisen ja todellisen entalpian erotus menee viimeisen jakson jälkeen turbiinin häviöksi. (Huhtinen et al. 2011)

Turbiinin ulkoiset häviöt huomioiva mekaaninen hyötysuhde määritetään kaavalla 5.8. (Raiko, M. et al. 1991).

$$\eta_m = (P_T - \phi_{tu}) / P_T = P_{Tax} / P_T \quad (5.8)$$

missä ϕ_{tu} on turbiinin ulkoiset häviöt, P_{Tax} on turbiinin akseliteho, P_T on turbiinin todellinen sisäinen paisuntateho. Turbiinin ulkoiset häviöt voidaan jakaa seuraavasti:

- Laakeri- ja tiivistekitka sekä öljypumpun tehontarve
- Johtumis- ja säteilyhäviö
- Tiivistepesähäviö

Turbiinin mekaanisia häviöitä ovat laakeri- ja tiivistekitkahäviöt, öljypumpun ja säätölaitteiden tehontarve sekä vaihteistoturbiinin alennusvaihteen häviöt. Häviöistä merkitsevin on öljypumpun tehontarve. Kitka- ja alennusvaihteen häviöt ovat erittäin pieniä. Lämpötilaero ja eristuksen lämpövastus määräävät johtumis- ja säteilyhäviön suuruuden, joka yleensä on hyvin vähäinen. Tiivistepesähäviössä höyry vuotaa ulos

turbiinin pesän tiivisteistä. Höyrynpaine, tiivisteiden lukumäärä, vuotopinta-ala ja tiivisteiden laatu määräävät höyryvuodon määrän. (Huhtinen et al. 2011)

5.4.2. Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde

Isentrooppisella prosessilla tarkoitetaan termodynamiikassa prosessia, joka on reversiibeli ja adiabaattinen. Reversiibelissä prosessissa systeemi ja ympäristö voidaan palauttaa alkuperäiseen tilaan. Adiabaattinen prosessi tarkoittaa systeemiä, jossa ei tapahdu lämmön siirtymistä eikä poistumista tapahtuman kohteena olevan aineen ja ympäristön välillä. Reversiibeli ja adiabaattinen prosessi on isentrooppinen, jossa entropia säilyy vakiona prosessin edetessä alkutilasta lopputilaan. (Wiksten 1996)

Höyryn paisunta häviöttömässä turbiinissa on isentrooppinen. Todellinen höyryturbiiniprosessi ei kuitenkaan ole häviötön, vaan entropiaa generoituu muun muassa kitkan ja häviöiden vaikutuksesta. Höyryturbiinin isentrooppisella hyötysuhteella kuvataan turbiinin todellisen paisunnan suhdetta isentrooppiseen paisuntaan. Isentrooppisella hyötysuhteella voidaan seurata turbiinin kuntoa ja se kertoo turbiinin häviöiden mm. vuotojen määrän. Isentrooppinen hyötysuhde η_s voidaan määrittää kaavalla 5.9. (Raiko, M. et al. 1991, Wiksten 1996)

$$\eta_s = \frac{h_6 - h_5}{h_{6'} - h_5} \quad (5.9)$$

missä h_5 on entalpia todellisessa paisunnassa, $h_{6'}$ on entalpia isentrooppisessa paisunnassa ja h_6 on entalpia paisunnan loppupisteessä.

5.4.3. Turbiinivakio

Turbiinin vyöhykkeen läpi virtaavan höyryn massavirralla on riippuvuus sen alku- ja loppupaineen sekä ominaistilavuuden kanssa. Kyseistä riippuvuutta kutsutaan kartiosäännöksi, jonka esitti Stodola jo 1920-luvulla. Kartiosäännöstä voidaan johtaa turbiinivakio K , joka voidaan laskea kaavalla 5.10. (DIN 1943)

$$K = \dot{m} \sqrt{\frac{p_1 v_1}{p_1^2 - p_2^2}} \quad (5.10)$$

Missä K on turbiinivakio yli vyöhykkeen, \dot{m} on massavirta vyöhykkeen läpi (ratkaistaan turbiinin massataseesta), p_1 on paine vyöhykkeen alussa (mitataan), p_2 on paine vyöhykkeen lopussa (mitataan) ja v on höyryn ominais-tilavuus. Turbiinivakion kaavaa voidaan hyödyntää esimerkiksi turbiinin mitoituksessa, kunnonvalvonnassa tai mallinnuksessa. Turbiinivakioon vaikuttaa muun muassa vyöhykkeen kierrosluku, virtaustila, likaantuminen, poistoaukon pinta-ala ja syöstöaste. (DIN 1943)

5.4.4. Turbiinin ominaiskulutukset

Isentrooppisen hyötysuhteen lisäksi turbiinin suorituskyvyn seuraamisessa käytetään myös ominaishöyrynkulutusta sekä ominaislämmönkulutusta. Ominaishöyrynkulutuksella tarkoitetaan turbiiniin menevän höyrymäärän suhdetta tuotettuun sähköenergiaan. Ominaishöyrynkulutus saadaan kaavalla 5.11. (DIN 1943)

$$d = \frac{\dot{m}_{FD}}{P} \quad (5.11)$$

missä \dot{m}_{FD} on höyryn massavirta turbiiniin ja P on generaattorin pätöteho.

Ominaislämmönkulutus puolestaan ilmaisee turbiinissa kuluvan höyryn energiamäärän suhteutettuna tuotettuun sähköenergiaan. Mitä pienempi ominaislämmönkulutus on, niin sitä vähemmän polttoainetta tarvitaan yhden sähköenergiayksikön tuottamiseen. Ominaislämmönkulutus saadaan kaavalla 5.12. (DIN 1943)

$$w = \frac{\sum (\dot{m}_j \Delta h_j)}{P} \quad (5.12)$$

missä \dot{m}_j on lämmitetyt massavirrat, Δh_j on massavirtojen entalpiasisäykset.

5.4.5. Generaattorin häviöt

Generaattorin hyötysuhde on erittäin korkea, noin 98 – 99 %. Häviöt koostuvat seuraavista tekijöistä:

- Tuuletus- ja hankaushäviöt
- Kuparihäviöt, jotka ovat kuormitusvirran aiheuttamia lämpöhäviöitä staattorikäämin resistansseissa
- Rautahäviöt, joita ovat magneettivuon vaihtelun aiheuttamat lämpöhäviöt staattorissa
- Magnetoimishäviöt, joita ovat magnetoimisvirran aiheuttamat häviöt magnetoimiskäämissä sekä magnetoimislaitteiston häviöt
- Lisähäviöt mm. kuormitusvirran aiheuttamat pyörrehäviöt staattorikäämeissä sekä kuormituksesta aiheutuvat rautahäviöt

250 MW:n generaattorissa magnetoimishäviöt aiheuttavat noin 0,4 % generaattoritehon P_g menetyksen. Tuuletus- ja johtumishäviöt aiheuttavat noin 0,3 % sekä kupari-, rauta- ja lisähäviöt kukin noin 0,2 % tehon menetyksen. Generaattorin hyötysuhde lasketaan kaavalla 5.13. (Raiko, M. et al. 1991)

$$\eta_g = (P_{Tax} - \phi_{gh}) / P_{Tax} = P_g / P_{Tax} \quad (5.13)$$

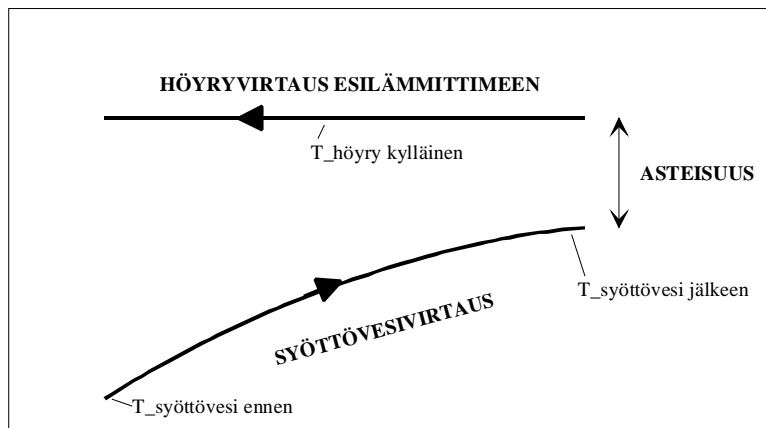
missä ϕ_{gh} on generaattorin häviöt. P_{Tax} on generaattorin akseliteho P_g on generaattorin sähköteho.

5.4.6. Lämmönsiirtimien asteisuus

Asteisuus tarkoittaa lämmönsiirtimen jäähtyvän virtauksen tulolämpötilan eroa lämpenevän virtauksen poistolämpötilaan. Lämmönsiirtimen toisella puolella olevan lauhduvan höyryn asteisuus tarkoittaa lauhdumislämpötilan ja lämmenneen virtauksen poistolämpötilan erotusta. Lämmönsiirtimen likaantuessa asteisuus nousee. Asteisuus on sitä parempi mitä pienempi se on. (Anon. 2000)

$$\Delta T_{COND} = T''_{kyl} - T_{vesi} \quad (5.14)$$

Missä ΔT_{COND} on lämmönvaihtimen asteisuus, T_{vesi} on veden lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen ja T''_{kyl} on lämmittävän höyryn kyllästyslämpötila.



Kuva 5.2: Lämmönsiirtimien asteisuuksien määrittäminen. (Anon. 2000)

5.4.7. Rakennusaste

Rakennusaste on vastapainevoimalaitoksen tärkein karakteristika ja se riippuu muun muassa tuorehöyryn paineesta ja lämpötilasta sekä vastapaineesta (Kaukolämmityksen käsikirja 1989). Tuorehöyryn paineen ja lämpötilan noustessa sähkötehoa saadaan enemmän ja tällöin rakennusastekin kasvaa. Rakennusaste kuvaa kaukolämpövoimalaitoksen sähkötehon suhdetta lämpötehoon. Käytännöllinen tapa pätötehon ja hyötylämmön riippuvuuden kuvaamiseen on niin sanottu Φ/P -diagrammi tai laitostekarakteristika. Rakennusaste lasketaan kaavalla 5.15.

$$\alpha = \frac{\text{Sähköteho}}{\text{Lämpöteho}} = \frac{P}{Q} \quad (5.15)$$

Kaukolämpövoimalaitoksilla rakennusaste on tyypillisesti noin 0,5 ja teollisuuden vastapainevoimalaitoksilla 0,3 – 0,4. Yleisimmät sähköntuotantoa ja rakennusastetta parantavat kytkentälisäykset ovat monivaiheinen kaukolämpöveden lämmitys, syöttöveden lämmitys väliottohöyryllä sekä välitulistus. Sähkö on aina arvokkaampaa kuin lämpö, jonka takia lämpö tulee tuottaa mahdollisimman alhaisella lämpötilatasolla. Kaukolämpölaitoksessa on yleensä kolmivaiheinen syöttöveden esilämmitys (matalapaine-esilämmittimet, syöttövesisäiliö ja korkeapaine-esilämmittimet), jolla saadaan lisättyä prosessin sähköntuotantoa. Esilämmittimien määrällä saadaan optimoitua saatu lisäsähköteho.. (Raiko, M. et al. 1991, Huhtinen et al. 2011)

Turbiinista saatavaa sähkötehoa voidaan lisätä kaksivaiheisella kaukolämpöveden lämmityksellä. Siinä kaukolämpövesi lämmitetään kahdella sarjaan kytketyllä lämmönvaihtimella, esimerkiksi ensin 70 °C:seen ja sen jälkeen toisella lämmönsiirtimellä 90 °C:seen. Kaksivaiheisessa kaukolämpöveden lämmityksessä voi puolet höyrystä paisua 0,5 baaria alhaisempaan paineeseen, koska lämmönsiirtimestä lähtevän veden loppulämpötila määrää tarvittavan höyryn paineen. Tämä mahdollistaa turbiinista saatavan sähkötehon lisäyksen 3 – 5 %:lla. (Huhtinen et al. 2011)

Sähkötehoa on mahdollisuus parantaa laskemalla vastapainetta. Höyryn paisuminen turbiinissa jää lyhyemmäksi, mikäli vastapainetta nostetaan. Tällöin saadaan sähkötehoa aikaisempaa vähemmän ja rakennusaste pienenee. (Raiko, M. et al. 1991)

Rakennusasteeseen vaikuttaa myös laitoksen kuorma. Kuorman laskiessa rakennusaste pienenee. Tämän takia kaukolämpöakulla varustettuja laitoksia kannattaa ajaa mahdollisimman korkealla kuormalla. (Raiko, M. et al. 1991)

Kaukolämpöverkkoon kytketyllä apujäähdyttimellä voidaan sähköä tuottaa enemmän kuin kaukolämpökuorma mahdollistaisi. Ylimääräinen lämpö voidaan johtaa lämmönvaihtimella järvi- tai meriveteen. Apujäähdyttimellä voidaan lisätä sähköntuotantoa pienillä investoinneilla, korkealla ostosähkön hinnan aikana. Käyttö rajoittuu kaukolämmön kulutushuippujen ulkopuolella.

Kaukolämpöjärjestelmään voidaan liittää kaukolämpöakku, jolla saadaan korkealla sähköntarpeella tuotettua sähköä maksimiteholla. Ylimääräinen lämpö varastoidaan kaukolämpöakkuun ja se puretaan pienen sähköntarpeen aikana. Akku soveltuu hyvin eri vuorokauden aikojen erojen tasaukseen: päivällä akku ladataan ja yöllä varaaja puretaan. (Huhtinen et al. 2011)

5.5. Omakäyttösähkö

Polttoaineella, polttotekniikalla ja laitostyypillä on vaikutus omakäyttösähkön kulutukseen. Lauhdelaitoksilla voimalaitoksen tuottamasta sähköstä 5 – 8 % kuluu omakäyttösähköön (Raiko, M. et al. 1991). CHP-laitoksilla omakäyttösähkön kulutus on suurempaa kuin lauhdelaitoksilla. Sen osuus on pienillä (alle 40 MW) CHP-laitoksilla noin 12 prosenttia sekä keskisuurilla (40 – 100 MW) ja suurilla (yli 100 MW) noin 9 prosenttia. Laitostyyppien sisällä vaihtelua aiheuttavat muun muassa laitoksen ikä,

kuorman vaihtelut, rinnakkaisten prosessilaitteiden määrä ja laitostkoko. Omakäyttösähkön valvonta vaatii tarkat raportointi- ja seurantajärjestelmät sekä paljon mittauksia. (Kara et al. 1998)

Polttoaineen käsittelylaitteet ovat kiinteitä polttoaineita polttavilla laitoksilla monimutkaisemmat kuin nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita polttavilla. Ilma- ja savukaasupuhaltimien tarvitsemiin tehoihin vaikuttavat polttoaineen kemiallinen koostumus ja kosteus. Teollisuusprosessien sivutuotteena saatavat polttoaineet vaativat käsittelyä ennen kattilaan syöttöä, joka lisää sähkön kulutusta. Omakäyttösähkön tarve lisääntyy merkittävästi, mikäli polttoaineessa on niin paljon rikkiä, että tarvitaan rikinpoistolaitos. (Kara et al. 1998)

Leijukerroskattiloiden puhallintehot ovat yleensä suurempia kuin pölypolttokattiloiden. CHP-laitoksilla on pienempi sähköntuotannon suhde käytettyyn polttoainemäärään kuin lauhdutusvoimalaitoksilla. Suhde on kaukolämpölaitoksilla suurempi kuin teollisuuden CHP-laitoksilla. (Kara et al. 1998)

Sähkön kulutuksessa omakäyttösähköksi luetaan kaikki muu laitoksen sähkön kulutus, paitsi kaukolämpöpumppujen käyttämä sähköenergia. Mikäli kohteen sähköenergian määrää ei tiedetä, voidaan energiamäärä laskea kohteen hetkittäisen tehon avulla. Teho yksittäiselle moottorille voidaan laskea kaavalla 5.16. (Aura et al. 2005)

$$P = \sqrt{3} * I * U * \cos \varphi \quad (5.16)$$

missä P on Teho, I on vaihdevirta, U on jännite ja $\cos \varphi$ on tehokerroin.

5.5.1. Pumput

Pumppu siirtää mekaanisen energian pumpattavaan nesteeseen. Voimalaitoksien olennaisimmat pumput ovat: syöttövesipumput, lauhdepumput ja jäähdytysvesipumput. Syöttövesipumppujen on tuotettava korkeita paineita (300 bar) ja niiden päätehtävä on syöttää vettä kattilaan ja nostaa syöttöveden paine kattilan paineeseen. Niiden on kestettävä myös korkeita lämpötiloja (100 – 200 °C), minkä takia syöttövesipumput ovat rakenteeltaan monivaiheisia sarjapumppuja. Standardi SFS 2864 asettaa vaatimuksia kattilalaitospumppujen määrästä, syöttötehosta ja käyttövoimasta. Yleensä kattilalaitoksessa on kaksi syöttövesipumppua 100 % teholla tai kolme pumppua 50 % teholla. Kaasu-, pöly- ja öljylämmitteisiin kattiloihin ei tarvita kuin yksi syöttövesipumppu. Voimanlähteenä pumpuilla voi olla höyryturbiini tai sähkö. Höyryturbiini on käyttökustannuksiltaan edullisempi, koska sähköntuotannon häviöt vältetään. Paineen noustessa yli 100 bar, joudutaan käyttämään ns. Barrel-pumppuja, jotta vältetään tiivistysongelmat. (Huhtinen et al. 2000)

Lauhdepumput ovat usein erilaisia keskipakopumppuja. Erittäin yleinen lauhdepumppu on säiliöön sijoitettu pystyrakenteinen uppopesäinen keskipakopumppu. Lauhduttimesta tulevan lauhteen lämpötila on lähellä lauhduttimen painetta vastaavaa veden kiehumispistettä, siksi on varmistettava riittävä imukorkeus kavitaation

estämiseksi. Suuria nostokorkeuksia voidaan saavuttaa pienilläkin pyörimisnopeuksilla asettamalla useita pyöriä sarjaan. (Holmström 1982, Huhtinen et al. 2000)

Jäähdytysvesipumput on suunniteltu pienille nostokorkeuksille ja suurille vesivirroille. Ne ovat usein yksivaiheisia keskipakopumppuja ja käytetyt materiaalit riippuvat jäähdytysveden korroosiivisuudesta. Jäähdytysvesipumppuja on seisovia ja makaavia, joista seisovat ovat yleisempiä. Niiden pyörimisnopeuden säätömahdollisuutta käytetään kylmällä jäähdytysvedellä tai osakuormaa ajettaessa, jolloin pumppujen tehonsäästö pienemmällä pyörimisnopeudella on suurempi kuin generaattorin sähkötehon laskeminen. Käyttöhäiriöiden välttämiseksi käytetään yleensä useita jäähdytysvesipumppuja. (Holmström 1982)

Pumpuilla siirretään nestetilavuus tietyssä ajassa toiseen paikkaan. Neste siirtoon pumpun on nostettava nesteen painetta. Pumpun nesteelle aiheuttamaa korkeusaseman lisäystä, johon sisältyy sekä imu- että painekorkeus nimitetään nostokorkeudeksi. Nostokorkeudella tarkoitetaan yleensä pumpun nesteelle aiheuttamaa paineen lisäystä Δp . (Huhtinen et al. 2011)

$$\Delta p = \rho g H \quad (5.17)$$

missä Δp on paineen lisäys, ρ on nesteen tiheys, g on putoamiskiihtyvyys ja H on nostokorkeus. Nostokorkeus voidaan määrittää valmistajan koeajossa seuraavalla kaavalla:

$$H = \left(\frac{[p_p - p_i]}{\rho g} \right) + h + \left(\frac{[v_p^2 - v_i^2]}{2g} \right) \quad (5.18)$$

missä p_p on painepuolen painemittarin lukema, p_i on painepuolen painemittarin lukema, H on imu- ja painepuolen mittareiden välinen korkeusero, v_p on nesteen nopeus painepuolen paineen mittauskohdassa ja v_i on painepuolen painemittarin lukema.

Pumpun ideaalinen tehontarve eli pumpun moottorilta ottama teho lasketaan seuraavalla kaavalla:

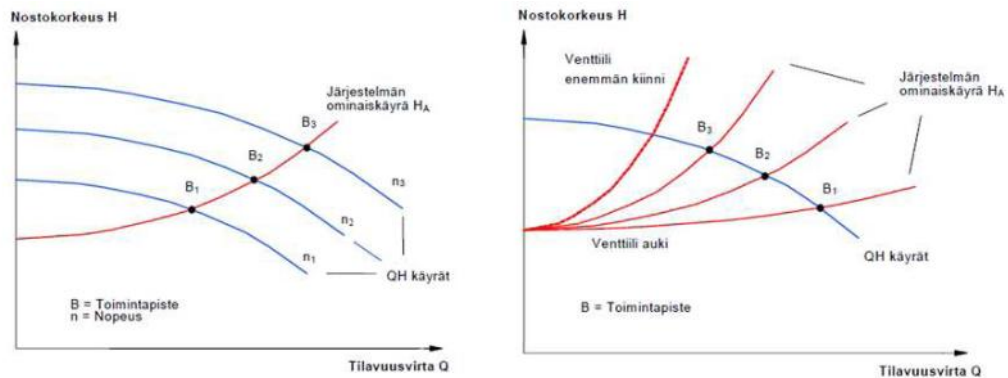
$$P_{\text{teor}} = \rho g H Q \quad (5.19)$$

$KaaQ$ on pumpun siirtämä tilavuusvirta. Pumpun todellinen tehontarve P_{tod} on suurempi kuin kaavassa 5.19 esitetty teoreettinen teho. Osa tehosta menetetään häviöihin kuten: sysäyshäviöihin, sekoitushäviöihin, kitkahäviöihin ja mekaanisiin häviöihin (Sulzer 2012). Pumppujen hyötysuhde saadaan laskettua pumpun akselille tuodun tehon ja hydraulisen tehon suhteena. (Huhtinen et al. 2011)

$$\eta = \frac{P_{\text{teor}}}{P_{\text{tod}}} \quad (5.20)$$

Energiatohokkuuden seurannan kannalta erittäin hyvä mittari on pumppujen ominaisenergiankulutus E_s . Se kuvaa pumpun käyttöä ja sitä ympäröivän systeemin suorituskkyä. Sitä seuraamalla voidaan havaita esimerkiksi ilmasuodattimen tai putkiston tukkeutuminen. Ominaisenergiankulutus voidaan laskea kaavalla 5.21. (Ahonen 2012)

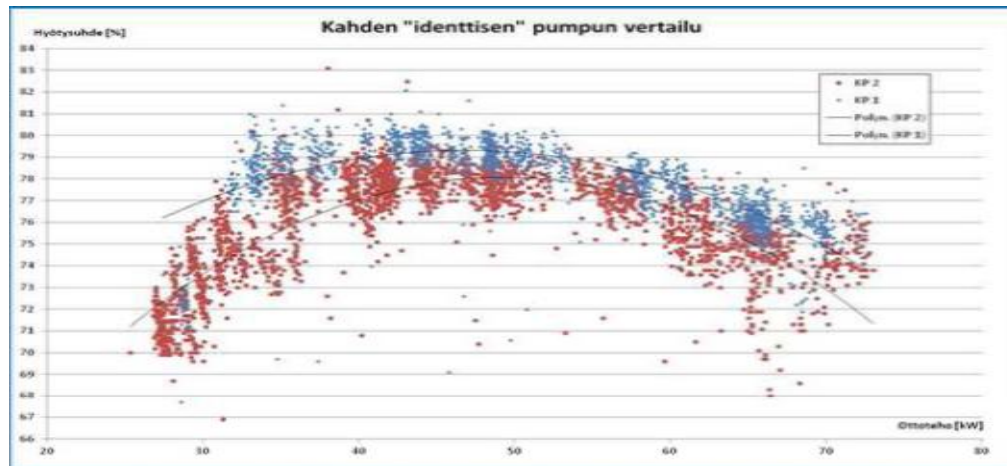
$$E_s = \frac{\text{Teho } P}{\text{Tilavuusvirta } Q} \quad (5.21)$$



Kuva 5.3: Pumpun ominaiskäyriä eri kierrosluvuilla. (Sulzer 2012)

Pumpuille voidaan määrittää enimmäisimukorkeus, koska pumpattaessa lähellä kylläistä tilaa (kiehumispistettä) olevaa vettä, on vältettävä pumpun kannalta haitallinen kavitaatioilmiö. Pumpun juoksupyörän siivistön pinnoille voi muodostua paikallisia pistemäisiä höyrykuplia, imupuolella tapahtuvan paineen laskun seurauksena. Siiven pinta voi hajota voimakkaan paineiskun seurauksena, veden siirtyessä pumpussa eteenpäin ja paineen nousun lauhduttaessa höyrykuplat äkillisesti. (Joronen et al. 2007)

Pumpun hyötysuhteen seurannalla havaitaan esimerkiksi pumpun kulumisesta aiheutunut hyötysuhteen aleneminen sekä voidaan valita paras ajotapa. Kuvassa (5.4) esitetään pumpun hyötysuhde ottotehon funktiona. Siitä huomataan, että kuluneen pumpun hyötysuhde on selkeästi huonompi kuin uudemman pumpun. Hyötysuhteen seurannan kannalta olennaisimpia suureita mitataan useissa tapauksissa. Tietoa on jalostettava paremmin ja ymmärrettävä, että pumppu on osa järjestelmää. Pumpun toimintaan vaikuttavat prosessin ohjaus ja muut prosessilaitteet. Pumpun toiminnan seuraamisella saadaan tärkeää tietoa myös sitä ympäröivän prosessin tilasta. (Ranta-Pere 2012, Sulzer 2012)



Kuva 5.4: Pumpun kulumisesta aiheutunut hyötysuhteen aleneminen (punainen datajoukko). (Ranta-Pere 2012)

5.5.2. Puhaltimet

Voimalaitoksissa tarvitaan puhaltimia esimerkiksi savukaasujen poistamiseen, kattilan palamisilmojen ja leijukerroskattilan leijutusilmojen puhaltamiseen sekä kiinteään polttoaineen pneumaattiseen kuljettamiseen. Savukaasupuhaltimia käytetään poistamaan kattilan savukaasuja siten, että kattilassa ja savukanavassa säilyy ulkoilman painetta alhaisempi paine (Raiko & Kirvelä 2005). Puhaltimet voidaan jakaa keskipako- ja aksiaalipuhaltimiin. Keskipakopuhaltimia käytetään korkeilla puhalluspaineilla (jopa 50 kPa). Ilma tulee keskipakopuhaltimeen akselin ympärillä olevasta imuaukosta ja tulee ulos juoksupyörän ulkoreunalta poistuen juoksupyörää ympäröivään spiraalipesään. Puhallettava kaasu virtaa aksiaalipuhaltimissa akselin suuntaisesti puhaltimen läpi. Niitä käytetään, kun ei ole tarvetta suurille ilmanpaineille. (Huhtinen et al. 2000)

Puhaltimien suorituskykyä voidaan myös seurata ominaisenergiankulutuksella kaavalla 5.21. Sen avulla saadaan selville puhallinsiipien likaantuminen. Puhallinsiipien epätasapaino aiheuttaa eniten puhaltimien ongelmia. Epätasapaino aiheutuu puhallinsiiville kerääntyneestä lian ja pölyn irtoamisesta. (Ahonen 2012)

5.5.3. Paineilma

Voimalaitoksen paineilman käyttöä voidaan tehostaa paineilma-analyysin avulla. Sen perusteella laaditaan laitokselle sopiva paineilman energiatehokkuuden seuranta. Paineilmakompressorin vuotuista sähkönkulutusta ja käyttötunteja tulee seurata säännöllisesti. Seurannan perusteella tehtävät huoltotoimenpiteet ovat tärkeässä asemassa paineilman käytön optimoinnissa. Hyvä paineilman energiatehokkuusmittari on ominaisteho, mikä lasketaan mitatun ilmavirran ja paineilmajärjestelmän sähkötehon avulla. Sopiva ominaisteho määräytyy tapauskohtaisesti. Siihen vaikuttavat painetaso ja jälkikäsitteilylaitteet. Paineilman energiatehokkuuden parantamisessa on vähennettävä painehäviöitä väljällä laitemitoituksella (kuivain, jälkijäähdytin) ja huolehdittava kompressorien suodattimien puhtaudesta. (Motiva 2006)

6. ENERGIATEHOKKUUSMITTARIT

Tässä kappaleessa käsitellään energiatehokkuusmittareiden muodostukseen liittyvää teoriaa. Energiatehokkuuden valvontasovelluksen olennaisin osa ovat energiatehokkuusmittarit. Niiden avulla pystytään tarkkailemaan laitoksen käyttäytymistä eri toimintapisteissä ja vertailemaan sitä vastaaviin tilanteisiin historiatietojen perusteella. Tavoitteena on saada mahdollisimman paljon energiatuotteita tietyllä polttoainemäärällä. Valvonnan seurannan kohteena ovat mittarit, jotka vaikuttavat saataviin energiatuotteisiin. Optimoimalla laitoksen toimintaa pystytään häviötehoja vähentämään ja mahdollistetaan laitoksen energiatehokas toiminta.

Energiatehokkuuden valvonnan kehittäminen aloitetaan kartoittamalla energian kulutus, prosessin hallinnan toiminnan taso, energia- ja raaka-ainevirrat ja laaditaan niitä parhaiten kuvaavat mittarit. Tuotantoprosessin rakenne on tunnettava tarkkaan. Painopistealueet ovat prosessiautomaatiossa, säätösuunnittelussa ja ajotapojen optimoinnissa. Tuotantoyksikön prosessitason mittaroinnin tulee olla kunnossa, jotta prosessista voidaan tehdä luotettavia energiatehokkuusanalyysijä. Energiatehokkuuden mittaroinnin tavoitteena on olla käyttöhenkilökunnan työkalu, jolla pystytään valvomaan ja tuottamaan vertailutietoa prosessien energiankäytöstä ja tehokkuudesta. Käyttöhenkilökunnalla on oltava mahdollisuus tehdä tarvittaessa muutoksia prosessiin. Mittaritiedon avulla tulisi prosessitasolla seurata yksittäisten laitteiden ja prosessien energiataseita. Mittausjärjestelmällä pystytään tutkimaan energiankäytön tehostamista vertaamalla arvoja tilanteeseen sopivaan referenssitason. Tuotannonjohto pystyy selvittämään energiatehokkuuden kääntyessä laskuun prosessitason energiatehokkuutta heikentävät tekijät ja kehittämään niitä edelleen. (VTT Energia 2004)

Energiatehokkuutta ei voida mitata yksiselitteisesti. Tämän takia on laadittava useita kuvaavia mittareita, joiden perusteella pystytään päättämään laitoksen energiatehokkuuden kehittyminen. Pattersonin (1996) mukaan energiatehokkuuden mittarit voidaan jakaa neljään ryhmään: termodynaamisiin, fysikaalis-termodynaamisiin, taloudellis-termodynaamisiin ja taloudellisiin. Mittareita voidaan käyttää yhdessä, jotta energiatehokkuuden muutos saadaan kuvattua mahdollisimman hyvin. Termodynaamiset mittarit kuvaavat sisään tulevaa energiaa ja prosessista käyttöön saatua energiaa, termodynaamisilla yksiköillä (joule ja watti). Fysikaalis-termodynaamisilla mittareilla sisään tuleva energia on mitattu termodynaamisilla yksiköillä ja poistuva energia fysikaalisilla yksiköillä. Taloudellis-termodynaamisilla mittareilla prosessin ulostulo on mitattu markkinahinnoilla ja sisään tulo

termodynaamisilla yksiköillä. Taloudelliset energiatehokkuuden mittarit perustuvat markkinahintoihin. (Patterson 1996)

Energiatehokkuuden valvonnan perustana ovat luotettavat mittaukset. Energiatehokkuuden optimoinnissa on tärkeä tarkastella koko mittausketjua, eikä vain yksittäistä mittalaitetta. Mittausongelmat eivät ole pelkästään mittausteknisiä, useat virheet syntyvät matkalla mittarin lukemasta lopulliseen tuotantoraporttiin. (Koski 2010)

Ennalta asetetut energiatehokkuustavoitteet määrittävät usein energiatehokkuusmittareiden käyttöönoton. Mittareilla pystytään seuraamaan energiankulutusta ja vertaamaan sitä referenssiajanjaksoon, -tasoon tai -laitokseen. Vertailuajanjaksona voi olla tietty vuosi tai IPPC-direktiivin mukainen BAT-taso. Termi ”benchmarking” kuvaa energiatehokkuuden vertausta referenssilaitokseen. Teollisuudessa käytetyn energian määrä suhteutetaan usein tuotannon määrään, jolloin saadaan selville ominaisenergiankulutus. Ominaisenergiankulutus (Specific energy consumption, SEC) määritetään seuraavalla kaavalla: (Suomen ympäristökeskus 2008)

$$SEC = \frac{\text{energiankäyttö}}{\text{tuotantomäärä}} \left[\frac{GJ}{t} \right] \text{ tai } \left[\frac{MWh}{t} \right] \quad (6.1)$$

Vertaamalla ominaisenergiankulutusta SEC esimerkiksi BAT-arvon mukaan valittuun referenssiarvoon SEC_{ref} referenssiajanjaksona voidaan energian käyttöä vertailla muihin laitoksiin. Arvoista voidaan muodostaa energiatehokkuusindeksi, jolla kulutusta on mahdollista verrata referenssiarvoon.

$$EEI = \frac{SEC_{ref}}{SEC} \quad (6.2)$$

Ominaisenergiankulutus voidaan suhteuttaa tuotannon lisäksi muun muassa pinta-alaa tai työntekijää kohden. Mikäli laitos tuottaa enemmän kuin yhtä tuotetta on järkevää seurata ominaisenergiankulutusta tiettyä energialajia kohden. BAT-asiakirjan mukaan energialajit jaetaan primääri- ja sekundäärienergiaksi. Primäärienergialla (polttoaine) tuotetaan sekundäärienergiaa kuten sähköä tai lämpöä. Kuluttajille toimitettu energia on energian lopputuotetta, koostuen primääri- ja sekundäärienergiasta. Ideaalitapauksessa energiankulutusta pitäisi seurata primäärienergiankulutuksen mukaan, joka voidaan määritellä seuraavasti:

$$SEC = \frac{E_{Polttoaine} + \frac{100}{\eta_{Sähkö}} E_{Sähkö} + \frac{100}{\eta_{Höyry}} E_{Höyry}}{\text{tuotantomäärä}} \quad (6.3)$$

missä $E_{Polttoaine}$ on polttoaineiden kulutus prosessissa, $E_{Sähkö}$ on sähkönkulutus, $E_{Höyry}$ on höyrynkulutus, $\eta_{Sähkö}$ on sähköntuotannon hyötysuhde ja $\eta_{Höyry}$ on höyryntuotannon hyötysuhde. Kaavan sähkön- ja höyryntuotannon hyötysuhteiden tulisi vastata

mahdollisimman hyvin laitoksen tuotantoa. Sähkön tuotannon hyötysuhde vaihtelee yleensä välillä 35 - 58 % ja lämmöntuotannon hyötysuhde välillä 85 - 95 %. Primäärienergian ominaiskulutuksen määrittäminen on käytännössä hankalaa, koska teollisuusintegraatissa on otettava huomioon polttoaineiden jakoperiaatteet sähkölle ja lämmölle. Kyseiset energiatehokkuusmittarit eivät ota kantaa energian arvoon, vaikka polttoaineen ja sähkön arvot vaihtelevat eri ajanjaksoina. (European Commission 2009)

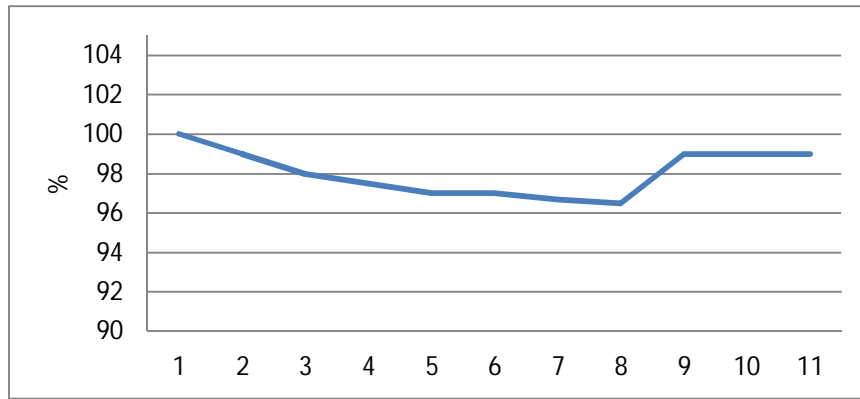
Energiatehokkuuden mittareiden käyttöönotossa on huomioitava taserajat, koska teollisuuden prosessit ovat monimutkaisia kokonaisuuksia. On mietittävä mittarikohtaisesti käyttötarkoitus ja seurantasykli. Energiatehokkuutta pystytään seuraamaan ja kehittämään paremmin, jos valittava ajanjakso on mahdollisimman lyhyt. Samoja mittareita ei välttämättä voida käyttää eri laitoksilla vaan mittarit tulee valita laitoskohtaisesti. (Suomen Ympäristökeskus 2008)

Energiatehokkuuden seurannassa tulisi keskittyä koko laitoksen energiatehokkuuteen. Prosessitason energiatehokkuuden perusteella ei välttämättä pystytä tekemään johtopäätöksiä kokonaisuudesta. Yksittäisten prosessien optimoinnissa esimerkiksi jätelämpöjen hyödyntäminen saattaa kärsiä. Parhaaseen lopputulokseen ei välttämättä päästä laitostason optimoinnilla, koska kaikkia osaprosesseja tai lämpövirtoja ei välttämättä voida yhdistää samaan tarkasteluun esimerkiksi etäisyyden vuoksi. Tämän takia taserajojen määrittäminen on energiatehokkuuden kannalta erittäin tärkeää. Paras kokonaisenergiatehokkuus saavutetaan systeemin optimoinnilla. (Suomen Ympäristökeskus 2008)

6.1. Mittareiden sovitteet

Diplomityössä on havaittu, että energiatehokkuusmittareiden laadinnassa on otettava huomioon suureiden välinen yhteys. Mittarin tavoitearvo vaihtelee eri tilanteissa esimerkiksi tehoalueen vaihtuessa. Tämän takia sovelluksen mittareiden muodostuksen pohjana on regressiomallinnus, jossa selitettävää suuretta pystytään mallintamaan yhdellä tai useammalla suureella. Matemaattiset mallit eivät välttämättä ole käyttökelpoisia kaikissa tilanteissa vaan jokainen tapaus on mietittävä erikseen. Sovitteiden määrittämisessä on suodatettu osa datasta pois, koska näin saadaan parempi vaste suureille (esimerkiksi karsimalla epäoleellisia tehoalueita pois).

Tavoitearvojen määrittämisessä voidaan käyttää revisioiden jälkeisiä arvoja. Laitokselle tehdyillä kunnonvalvontamittauksilla saadaan myös selville, millä tasolla arvojen tulisi tietyissä toimintapisteissä olla. Kolmas vaihtoehto on etsiä historiadatasta referenssiarvoja. Tällöin nähdään, miten laitos on käyttäytynyt tietyissä tilanteissa ja tavoitearvot perustuvat todellisiin tietoihin. Laitteet vikaantuvat ajan myötä. Revisioiden jälkeen päästään paremmalle tasolle, joka on kuitenkin huonompi kuin laitevalmistajan alunperin määrittämä lähtötaso. Valvontasovelluksen avulla voidaan tehdä muutoksia revisiosykliin. Seuraavassa kuvassa 6.1 on esitetty esimerkki revision jälkeisistä paremmista arvoista.



Kuva 6.1: Esimerkki laitteiden tehokkuudesta käyntiajan funktiona.

6.1.1. Pienimmän neliösumman menetelmä

Sovitteiden kertoimet määräytyvät pienimmän neliösumman menetelmän perusteella. Datan ja sovituksen välistä yhteneväisyyttä kuvaa korrelaatiokerroin. Tässä kappaleessa esitellään menetelmän taustalla olevaa teoriaa.

Tarkastellaan muuttujien x ja y välistä riippuvuutta, joista x on selittävä muuttuja ja y selitettävä muuttuja. Valitaan x :n arvot x_1, x_2, \dots, x_n ja niitä vastaavat y :n arvot y_1, y_2, \dots, y_n regressiokäyrän $y = f(x)$ muodostamiseksi. Tuntemattomat parametrit a_1, a_2, \dots, a_n määräävät käyrän $y = f(x)$ muodon. Mallin parametrien arvot saadaan minimoimalla mitattujen ja mallin avulla laskettujen y :n arvojen erotusten neliösumma. Minimi saadaan osittaisderivoimalla neliösumma parametrien suhteen kaavalla 6.4. (Laininen 1998, Äijälä 1993)

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i; a_0, \dots, a_m))^2 = 0, \quad \text{kun } k=0, \dots, m \quad (6.4)$$

Missä a_k on mallin parametri, x_i on selittävä suure, y_i on selitettävä suure, m ja n on parametrien ja mittausten lukumäärä.

Oletetaan muuttujien x ja y yhteys lineaariseksi, jolloin $y = a_1x + a_0$ neliösumman yhtälöryhmä voidaan laskea seuraavasti:

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{i=1}^n (y_i - a_1x_i - a_0)^2 = 0, \quad \text{kun } k = 0, 1 \quad (6.5)$$

Parametrit a_0 ja a_1 saadaan ratkaistua kaavoilla 6.6 ja 6.7.

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.6)$$

$$a_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (6.7)$$

Pienimmän neliösumman menetelmää on mahdollista soveltaa myös epälineaarisille yhtälöille, koska paraabeli $y = a_2x^2 + a_1x + a_0$ on epälineaarinen x :n suhteen, mutta lineaarinen parametrien a_k suhteen. (Laininen 1998, Äijälä 1993)

6.1.2. Korrelaatiokerroin ja selityssaste

Yhteiskorrelaatiolla r voidaan tarkastella mallin ja havaintojen yhteensopivuutta. Se lasketaan muuttujien x ja y keskihajontojen s_x ja s_y sekä kovarianssin s_{xy} perusteella. Varianssi s_x^2 kuvaa arvojen vaihtelun suuruutta odotusarvon ympärillä. Keskihajonta s_x , joka on varianssin positiivinen neliöjuuri mittaa x :n arvojen keskimääräistä poikkeamaa odotusarvosta. Odotusarvo vastaa x :stä tehtyjen havaintojen aritmeettista keskiarvoa. Varianssi voidaan laskea muuttujalle x kaavalla 6.8. (Laininen 1998, Äijälä 1993)

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.8)$$

Muuttujien x ja y lineaarista riippuvuutta kuvaava kovarianssi s_{xy} lasketaan kaavalla 6.9.

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (6.9)$$

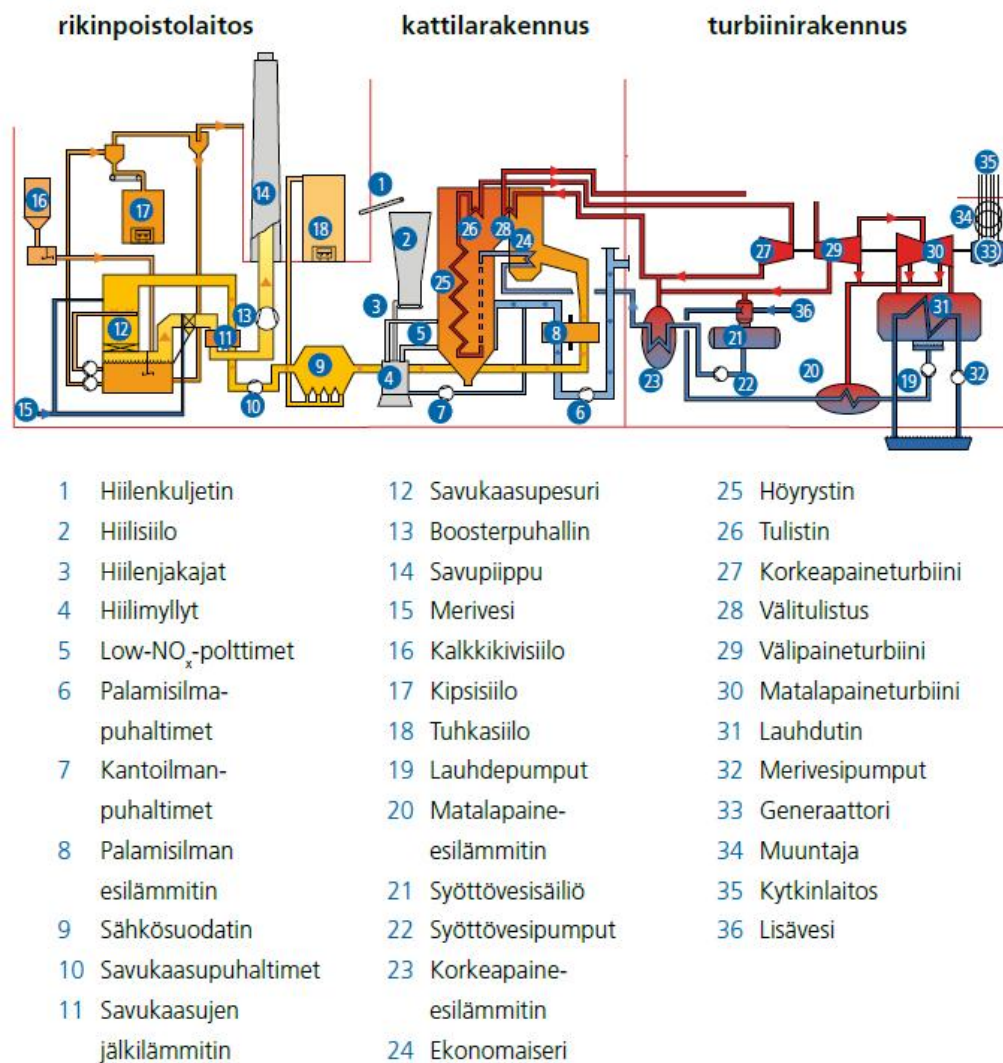
Muuttujien x ja y keskihajonnasta riippuvainen kovarianssi ei ole yksikäsitteinen mitta. Tämän takia eri tapauksien vertailuun tarvitaan korrelaatiokerroin r , joka määritetään kaavalla 6.10.

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.10)$$

Korrelaatiokertoimen r arvot ovat välillä $-1 \leq r \leq 1$. Mikäli korrelaatiokerroin $r = \pm 1$, niin x ja y ovat toisistaan lineaarisesti riippuvaisia. Korrelaatio on voimakas kun $|r| \geq 0,8$, huomattava kun $0,6 \leq |r| \leq 0,8$, kohtalainen kun $0,3 \leq |r| \leq 0,6$ ja korrelaatiokertoimen itseisarvon ollessa pienempi kuin 0,3 se on merkityksetön. (Laininen 1998)

7. PVO-LÄMPÖVOIMA TAHKOLUODON VOIMALAITOS

Porin Tahkoluodossa sijaitseva Tahkoluodon voimalaitos valmistui vuonna 1976. Se käyttää polttoaineenaan pääasiassa kivihiiltä sekä vara- ja käynnistyspolttoaineena raskasta polttoöljyä. Laitoksen tehoa on nostettu laitteita modernisoimalla alkuperäisestä 220 megawattista 252 megawattiin. Tehon noston seurauksena laitoksen hyötysuhde on parantunut merkittävästi. (Tahkoluoto 2012)



Kuva 7.1: Tahkoluodon yksinkertaistettu prosessikaavio (Tahkoluoto).

7.1. Kattila

Kattila on vuonna 1976 käyttöön otettu Benson-läpivirtauskattila, jonka korkeapainehöyryn paine on 186 bar, lämpötila 535 °C ja virtaus 200 kg/s. Kattilan hyötysuhde on 92,5 %. Liitteessä 1 on esitetty kuva Tahkoluodon kattilasta. Läpivirtauskattilan toiminta ja Benson-kattilan erityispiirteet on esitetty tarkemmin kappaleessa 3. (Tahkoluoto 2012)

Valmistaja	Oy Tampella Ab, Tampere
Tyyppi	Tampella-Babcock läpivirtauskattila
Low-Nox polttimet	Hitachi NR 3, 16 kpl
Polttoaineen kulutus	2000 t/vrk kivihiiltä
Tulipesän tilavuus	2400 m ³
Kattilateho	560 MW
Hyötysuhde	92,5 %
Korkeapainehöyry	
*Paine	181 bar
*Lämpötila	535 °C
*Virtaus	200 kg/s
Välitulistus	
*Paine	27 bar
*Lämpötila	535 °C
*Virtaus	162 kg/s
Polttoaine	Kivihiili (polttoöljy)
Hiilisiilot	4 kpl á 1000 m ³
Hiilimyllyt	4 kpl kuularengasmyllyjä

Taulukko 7.1: Kattilan tekniset tiedot (Tahkoluoto 2012)

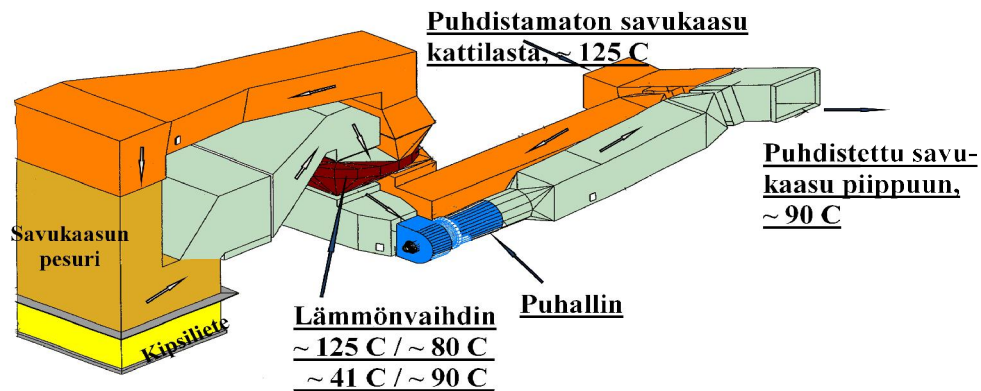
7.1.1. Apukattila

Tahkoluodon voimalaitoksen apukattila on teholtaan noin 20 MW:n (16 bar, 204 °C) kylläisen höyryn luonnonkiertokattila. Siinä ei ole tulistinta eikä savukaasupuhallinta. Savukaasujen kulkeutuminen perustuu luonnonvetoon. Se on käytössä ainoastaan laitoksen seisonta-aikana ja käynnistystilassa, jolloin se tuottaa laitoksen omakäyttölämmön. Apukattila syöttää 13 bar:sta höyryä höyrynjakotukkiin. Se on koko ajan toimintavalmiudessa mahdollisten häiriöiden varalta. (Nuto)

7.1.2. Rikipoistolaitos

Tahkoluodon voimalaitoksen käytettävyys on riippuvainen rikipoistolaitoksen toiminnasta. Laitoksen rikipoistolaitoksen toimintakaavio on esitetty kuvassa 7.2. Rikipoistoprosessi on myötävirtainen märkäpesumenetelmä, jonka erotuskyky on noin 70 %. Savukaasupesuriin johdetaan savukaasujen joukkoon alkalinen pesuneste ja alkalina käytetään kalkkikiveä (CaCO₃). Savukaasut esipuhdistetaan

kiintoainehiukkasista sähkösuodattimessa ennen rikinpoistolaitosta. Rikinpoistolaitoksen märkäpesumenetelmässä rikkidioksidi (SO_2) erotetaan absorptiotornissa ja hapetetaan edelleen kalsiumsulfaatiksi (CaCO_3). Rikinpoistolaitos on erittäin suuri omakäyttösähkön kuluttaja. (Nuto)



Kuva 7.2: Tahkoluodon rikinpoistolaitoksen toimintakaavio (Tahkoluoto 2012)

7.2. Turbiini

Laitoksen turbiini on Leningradin metallitehtaan vuonna 1976 valmistama kolmipesäinen väliottolauhdutusturbiini, jossa on 7 väliottoa. Turbiinin väliotoista otetaan höyryä syöttöveden esilämmitykseen, syöttövesisäiliöön ja muihin omakäyttöhöyryjärjestelmiin. Turbiinia on modernisoitu laitoksen eliniän aikana useita kertoja. Vuonna 1987 laitoksen teho nostettiin 220 megawatista 240 megawattiin turbiinin kp- ja vp-pesien modifioinnilla. Matalapaineosa modifioitiin vuonna 1995 ja teho nousi 244 megawattiin. Vuonna 2005 suoritettiin uusien kp- ja vp-pesien hankinta Alstomilta, jolloin teho nousi 252 megawattiin. Liitteessä 2 on esitetty kuva Tahkoluodon turbiinista. (Nuto)

Tuorehöyry johdetaan kattilalta kp-pikasulkuventtiilille, josta höyry kulkee turbiinin kp-pesän alla sijaitseville neljälle säätöventtiilille. Jokaisella säätöventtiilillä on oma servomoottori, joka ohjaa venttiilin toimintaa. Säätöventtiilien jälkeen höyry menee sisäpesään kiinnitetyille kp-pesän suutinkammioille. Korkeapainepesä koostuu sisä- ja ulkopesästä, joissa molemmissa on vaakasuorat jakotasot. Kp-pesässä on 27 vyöhykettä, joista sisäpesässä sijaitsevat 14 ensimmäistä vyöhykettä muodostavat vasemman juoksun ja ulkopesässä sijaitsevat loput 12 vyöhykettä muodostavat turbiinin oikeanpuoleisen juoksun. Höyryn virtaussuunta kääntyy 180° sisäpesän jälkeen ja lämmittää ulko- ja sisäpesän ulkopinnat, jonka jälkeen höyry virtaa ulkopesän jaksojen 16–27 läpi. Kp-pesästä otetaan höyryä kahdesta väliotosta, väliotto 1:stä esilämmitin 7:lle ja väliotto 2:sta esilämmitin 6:lle sekä 13 bar:in omakäyttöhöyrytukille. Höyry kulkeutuu kp-pesästä välitulistimeen, josta se johdetaan kahdelle vp-pikasulkuventtiilille. Niistä höyry kulkeutuu vp-pesän neljälle säätöventtiilille. 12 vyöhykkeisestä vp-pesästä otetaan höyryä neljästä väliotosta. Korkeapaine-esilämmitin 5:lle otetaan höyryä väliotto 3:sta, syöttövesisäiliöön väliotto 4:sta, matalapaine-

esilämmitin 3:lle väliotto 5:sta ja matalapaine-esilämmitin 2:lle väliotto 6:sta. Vp-pesästä höyry johdetaan matalapainepesään, josta höyry johdetaan lauhduttimeen. (Nuto)

Tahkoluodon voimalaitoksessa on kaksi pintalauhdutinta, jotka ovat vesipuolelta kaksiteiset. Kummallakin lauhduttimella on erillinen jäähdytysveden kierto ja niiden höyrytilat on yhdistetty keskenään tasausyhteellä, jotta poistohöyry voidaan päästää toiseen lauhduttimeen. Jäähdytysvesi pumpataan putkinippujen läpi, jotka sijaitsevat lauhduttimen höyrytilassa. Turbiinilta tuleva höyry lauhtuu ja luovuttaa lämpöä putkien läpi virtaavalle jäähdytysvedelle. Höyryn painehäviö on pieni, koska höyryn ja putkien kosketuspinta on suuri. Väliseinät mahdollistava lauhdevirran säätelyn, mutta eivät estä höyryilmaseoksen virtaamista. Lauhduttimen höyrytilasta voidaan poistaa lauhtumattomat kaasut kahdella putkella etummaisten vesikammioiden puolelta. Lauhduttimen hotwell on jaettu kahteen erilliseen osaan. Lauhdepumppu pumppaa ensimmäisessä vaiheessa lauhteen hotwellin likaisesta puolesta lauhteen puhdistuslaitoksen kautta puhtaaseen osaan. Toisessa vaiheessa lauhdepumput pumppaavat lauhteen puhtaasta osasta ja syöttävät sen päälauhdelinjaan. Lauhduttimeen voidaan johtaa käynnistys- ja kuormanmuutostilanteissa höyryä mp-reduktioasemilta. Laitoksen vesi- ja höyrykiertoon lisättävä vesi syötetään lauhduttimeen. (Nuto)

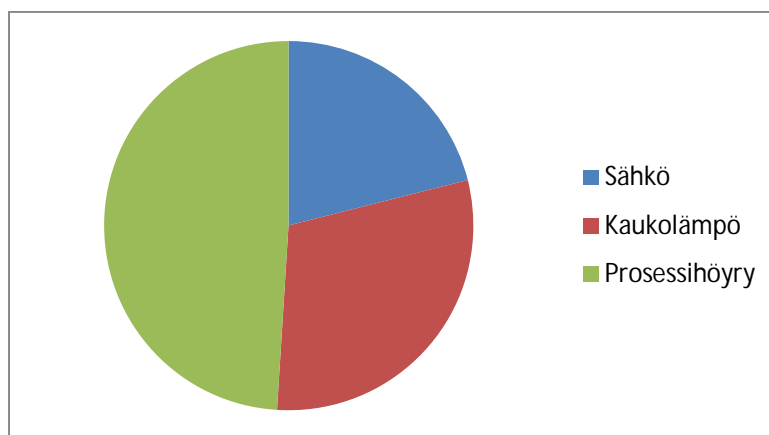
7.3. Erityispiirteet

Laitoksen vuotuiset käyttötunnit ovat vaihdelleet paljon eri vuosina. Siihen vaikuttaa ensisijaisesti sähkön markkinahinta (Nordel). Vuonna 2011 käyttötunteja oli noin 2000 h/a, kun vuonna 2010 vastaava luku oli luokkaa 6800 h/a. Pitkien seisonta-aikojen takia laitoksen omakäyttösähkön seuranta on tärkeässä asemassa. Tahkoluodon voimalaitoksella on 12 tunnin valmiusaika, jolloin laitoksen on oltava verkossa. Rikipoistolaitos on erittäin suuri omakäyttösähkön kuluttaja. Päästörajojen tiukentumisen seurauksena sen toiminta on erittäin oleellinen laitoksen käytölle. (Nuto, Tahkoluoto 2012)

Laitos ottaa omakäyttöhöyryä kolmesta höyrytukista, joiden paineet ovat 13 bar, 4,5 bar ja tehon mukaan liukuva 2 – 5 bar. Laitoksen seisoessa höyry tulee apukattilalta. Höyryluvo ja syötövesisäiliö ovat suurimmat omakäyttöhöyryn kuluttajat. Syötövesisäiliö on pidettävä aina lämpimänä, jotta varmistetaan nopea toimintavalmius. Polttoöljyn lämmittäminen ja öljyn hajottaminen sumuksi kuluttavat myös höyryä, kun laitos on käynnissä. (Nuto)

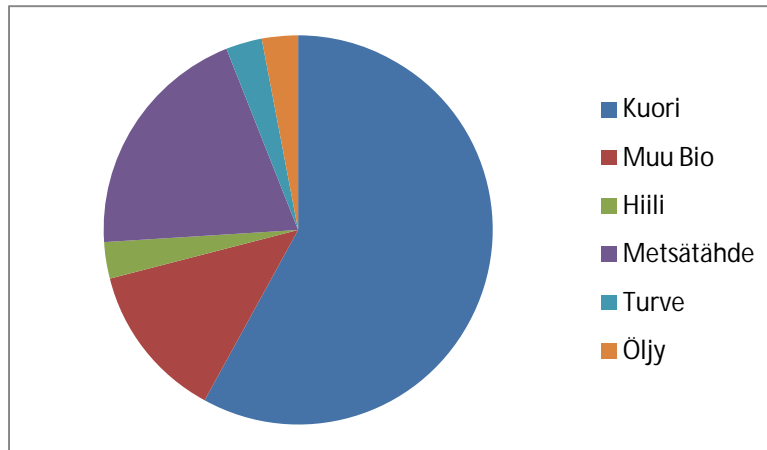
8. RAUMAN VOIMA OY

Rauman Voima Oy:n omistus jakautuu Pohjolan Voima Oy:lle (72%) ja Rauman Energia Oy:lle (28%). Voimalaitoksen tuotantoteho on 65 megawattia sähköä, 140 megawattia prosessihöyryä ja 50 megawattia kaukolämpöä (kuva 8.1). Laitos tuottaa prosessihöyryä ja sähköä UPM:n tehtaalle sekä sähköä ja kaukolämpöä Rauman Energia Oy:lle. (Rauman Voima).



Kuva 8.1: Energiatuotteiden jakautuminen (Rauman Voima)

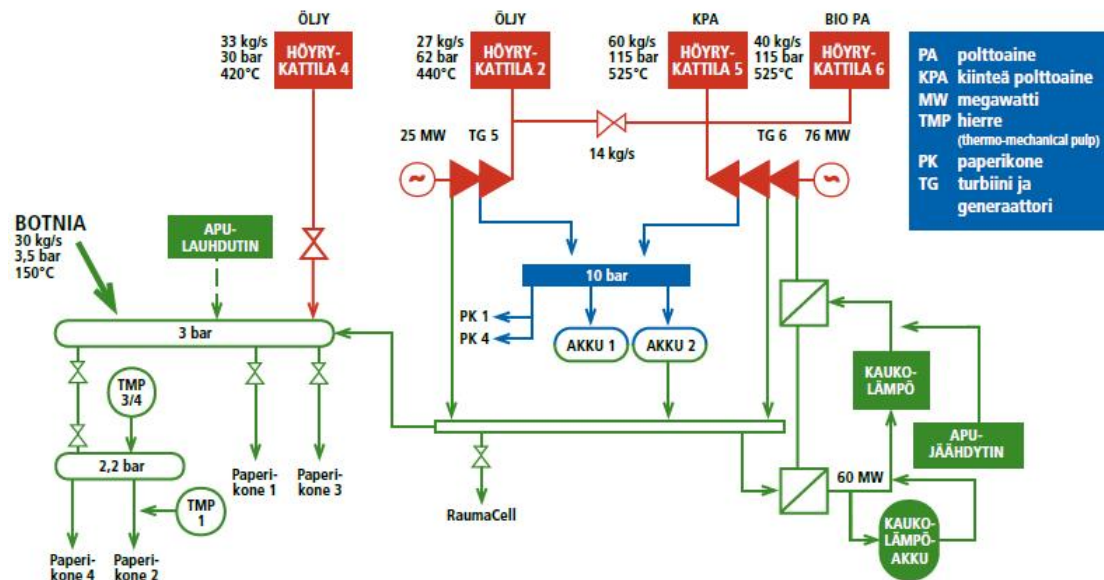
Rauman voimalaitoksella käytetään pääpolttoaineena kuorta ja hakkuutähteitä, joita poltetaan kattiloissa HK5 ja HK6. Polttoaineena käytetään myös pieniä määriä turvetta, kivihiiltä, biolietettä sekä kierrätyspolttoaineita. Öljyä käytetään käynnistys- ja varapolttoaineena ja sitä poltetaan kattilassa HK4, pääasiassa huipputeholla ja häiriötilanteissa. Polttoaineyhdistelmää ei pystytä säätämään kattilakohtaisesti. Polttoaineiden käyttö jakautuu kuvan 8.2 mukaan. Polttoaineet vaihtelevat paljon eri vuodenaikoina. Kesällä poltetaan kiinteän polttoaineen kattiloissa lähinnä kuorta. Talvella käytetään myös polttoainekentälle varastoituja metsätähteitä, risuja, kantoja ja harvennuspuuta. Laitoksella on myös sopimus kierrätyspolttoaineiden käytöstä. Muita polttoaineita (bio, ref 1 ja ref 2) käytetään syksystä eteenpäin. Turvetta ja hiiltä käytetään varapolttoaineena lähinnä talvipakkasilla. Näiden käyttöön vaikuttaa talven keskilämpötila. Rauman Voimalla on kaksi polttoaineen murskainta, joilla murskataan puuta ja kierrätyspolttoaineita. Auma polttoainevarastoon varastoidaan laitoksen ulkopuolelta tuleva valmiiksi murskattu polttoaine. Kuori varastoidaan kuorikentälle, josta se puretaan ruuvilla hihnakuuljettimelle. Polttoaineet yhdistetään ja kuljetetaan hihnakuuljettimella kattiloille.



Kuva 8.2: Laitoksen polttoaineiden käytön jakautuminen (Rauman Voima)

Kuvassa 8.3 on esitetty Rauman pähöyryverkko ja höyryn loppukäyttäjät.

PÄÄHÖYRYVERKKO



Kuva 8.3: Rauman pähöyryverkko (Rauman Voima).

Kaukolämpöverkkoon on kytketty ilmajäähdytteinen apujäähdytin, jolla saadaan turbiiniin kuormaa tilanteessa, jossa kaukolämpökuorma on pienempi kuin turbiinin minimikuorma. Sillä saadaan lisättyä sähköntuotantoa tarvittaessa. Apujäähdytintä käytetään myös lisäämään laitoksen lämpökuormaa tilanteessa, jossa kattilan (tai kattiloiden) teho putoaa alle lämpöteknisen mitoituksen. Tässä tilanteessa kattila jouduttaisiin muuten pysäyttämään. Kiinteän polttoaineiden kattiloiden minimikuorma on noin 30 % mitoitustehosta. Apujäähdytin on kesällä käytössä koko ajan. Apujäähdytin on kytketty glykolipiiriin. Glykolipiiri on kytketty lämmönvaihtimella kaukolämpöverkkoon.

Turbiini TG6 on vuonna 2006 käyttöönotettu Siemens Ag:n valmistama väliotto- ja vastapaineturbiini, jonka sähköteho on 76 MW. Turbiinissa on väliotot 10

bar ja 3 bar, joilla tuotetaan höyryä sekä lauhdeperä kaukolämmön tuotantoon. TG6 on käytännössä ajossa koko ajan. Turbiinin kaukolämpöperään on kytketty kaksi kaukolämmönvaihdinta.

Laitoksella on varaturbiinina vuonna 1973 käyttöönotettu yksipesäinen vastapaineturbiini TG5, jonka käyttö on viime vuosina ollut erittäin vähäistä.

8.1. Höyrykattila HK5

Höyrykattila HK5 on vuonna 1996 käyttöönotettu kiertopetikattila (CFB). Se on Tampella Power Oy:n (nykyisin Metso Power) valmistama ja suunnittelema CYMIC (Cylindrical multi-inlet cyclone inside the furnace) kattila. HK5 hyödyntää varapolttoaineena kivihiiltä, mutta pääasiassa se käyttää biopolttoaineita. Kattilan teho on biopolttoaineilla (kuori-liete seos ja turve) 160 MW (60 kg/s) ja kivihiilellä 185 MW (69 kg/s). Tuorehöyryn arvot ovat 115 bar (y) ja 530 °C. Käynnistyspolttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä. Liitteessä 3 on esitetty kuva HK5:stä. (Rauman Voima)

HK5	CYMIC CFB 1996
Teho	178 MW _{fuel} , 160 MW _{th} /184 MW _{th} hiilellä
Höyrynarvot	60/69 (hiili) kg/s, 530 °C, 115 bar
Polttoaineet	Kuori, liete, turve, REF1, metsätähde, kivihiili, POR
Primääri-ilma	esilämmitetty leijutusilma arinan alle, 2 ilmakaappia ja 2 puhallinta
Polttoaineen syöttö	2 syöttöpistettä etu- ja 2 takaseinällä kivihiilellä omat kuljettimet, muut polttoaineet tulevat valmiina seoksena
Pesuri	Vanha soodakattilan 2-vaiheinen pesuri, 50 % NaOH säädetään yläkierron pH

Taulukko 8.1: HK5 tekniset tiedot.

Savukaasujen puhdistuksessa pölyn poisto tehdään sähkösuotimella ja savukaasupesurilla. Rikkiyhdisteiden poisto suoritetaan kalkkikivi-injektiota käyttämällä ja typen oksidien poisto ammoniakki-injektiolla. HK5:llä ammoniakkiveden syöttöä käytetään satunnaisesti. Kalkki menee kuljetusilman avulla tulipesään. Kuljetusilma otetaan leijutusilmakanavasta.

Kattilan käynnistyksessä käytetään neljää öljypoltinta, jotka on sijoitettu tulipesän molemmille sivuseinille. Petiä leijutetaan käynnistyksessä miniminopeudella ja se lämmitetään polttimilla polttoaineen syttymislämpötilaan. Käynnistyspolttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä.

Polttoaineen syöttölaitteisiin kuuluvat biopolttoaineiden polttoainesiilo ja purkaimet, hiilisiilot ja purkaimet sekä varsinaiset polttoaineen syöttimet. Biopolttoainesiilon purkainruuvi syöttää polttoaineen kolakuljettimelle, joka tuo polttoaineen kattilan sisälle ja pudottaa sen jakoruuveille. Jakoruuvit vievät polttoaineen kattilan etu- ja takaseinän suuntaisille syöttökuljettimille. Biopolttoaine ja hiili sekoittuvat jakoruuveissa, joihin hiilisiilojen kolakuljettimet syöttävät hiilen. Polttoaineet jakautuvat tasaisesti jokaiseen syöttötorveen. Syöttökuljettimilta polttoaine

jaetaan pudotustorviin, joissa ovat ruuvit ja sulkusyöttimet. Tämän jälkeen polttoainerorvet menevät tulipesään. Kuljettimia ohjataan kattilan tehoviestin mukaan ja käytöt on varustettu nopeuden säädöllä. Petihiekka syötetään siilolta oman yhteyden kautta tulipesään.

8.2. Höyrykattila HK6

Höyrykattila HK6 on Kvaernerin (nykyisin Metso Power) vuonna 2006 valmistama kerrosleijukattila (bubbling fluidized bed boiler, BFB). Kattilan teho on 107 MW ja tuorehöyryn arvot ovat 540 °C ja 115 bar(y). HK6 käyttää polttoaineena ainoastaan biopolttoaineita, pääasiassa kuorta. Muut polttoaineet ovat liete, metsäpolttoaineet, turve sekä kierrätyspolttoaineet. Liitteessä 2 on esitetty kuva HK6:sta. (Rauman Voima)

Höyrystinkierto on toteutettu luonnonkiertoisena. Palamisilma lämmitetään höyry- ja savukaasuluvolla. Polttoaineiden syöttöaukot on syötetty kattilan sivuseinille. Palamisilma syötetään tulipesään primääri-ilmana tulipesän pohjalta. Palamisilmaa syötetään myös sekundääri- ja tertiääri-ilmasuuttimista, jotka sijoittuvat tulipesän etu-, taka- ja sivuseinille. Tulistin on kolmivaiheinen ja niiden välissä on ruiskutusjäähdyttimet höyryn tulistuksen säätöä varten.

Syöttöveden esilämmitin koostuu neljästä sileäputkiekonomaisesta. Savukaasulämmitteinen ilman esilämmitin käsittää primääri- ja sekundääri-ilman lämpöpintapaketit. Luvon tarkoituksena on nostaa kattilahiötysuhdetta laskemalla kattilasta poistuvien savukaasujen lämpötilaa ja samalla nostaa palamisilman lämpötilaa, mikä edistää kosteiden polttoaineiden palamista. Kattilan jälkilämpöpintojen suojaamiseksi matalalämpötila-korroosiota vastaan on primääri- ja sekundääri-ilmapuhaltimien painepuolelle ennen savukaasuluvoja asennettu erilliset matalapainehöyrylämmitteiset ilman esilämmittimet. Ulkoa otettava palamisilma lämmitetään glykolivesi-esilämmityspatterilla. Petilämpötilaa säädetään kierrättämällä osa savukaasuista primääri-ilman joukkoon arinailmaksi.

Kattilan savukaasujen puhdistukseen kuuluu pölynpoisto pussisuodattimella, rikkiyhdisteiden poisto kalkkikivi-injektiolla sekä typen oksidien pelkistys ammoniakki-injektiolla (SNCR). Ammoniakkisyöttösuuttimia käytetään NO_x-päästöjen hallintaan. Kattilan kuorma määrää tason, johon ammoniakkia syötetään. Kalkinsyöttöä käytetään, kun SO₂-päästöt nousevat yli ympäristöluvan mukaisen rajan.

Savukaasut puhdistetaan kiintoaineista letkusuodattimessa. Ne johdetaan letkusuodattimen tulokanavasta tulopeltien kautta letkukorien ja suodatinletkujen läpi suodattimen yläkammioon, josta edelleen kattilan savukaasupuhaltimien imupuolelle. (Niemitälo)

8.3. Höyrykattilat HK4 ja SK2

Höyrykattila HK4 on vuonna 1989 valmistunut raskaspolttoöljykäyttöinen vara- ja huipputehokattila. Kattilan lämpöteho on 96 MTTh ja se vuosittaiset käytötunnit ovat noin 200. HK4 on luonnonkiertokattila, joka on varustettu yhdellä lieriöllä. Kattila ajaa noin 27–33 bar painetta, noin 425 °C lämpötilaa ja enintään 33,3 kg/s höyrymäärää reduktioiden jälkeen 3 bar ja 10 bar tukkeihin. Kattilassa ei ole savukaasupuhallinta, koska kattilan käydessä tulipesässä on ylipaine.

Laitoksella on myös huippu- ja varakattilana toimiva SK2, joka käyttää polttoaineena raskasta polttoöljyä. Sitä ei ole käytetty vuoden 2006 jälkeen ja sen käyttö päättyy vuonna 2015.

8.4. Erityispiirteet

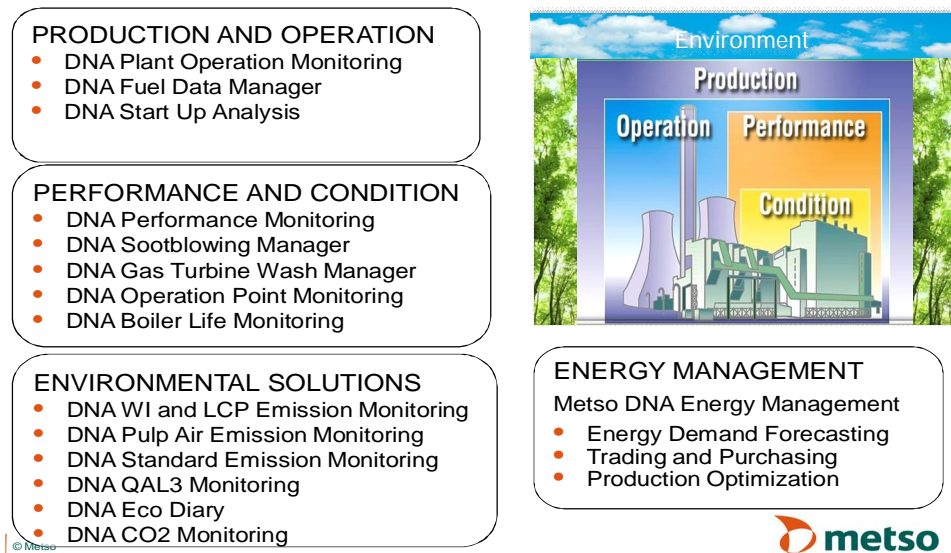
Laitoksen tärkeimmät ominaispiirteet ovat kuorman suuret vaihtelut ja polttoaineen laatuvaihtelut. Nämä ominaispiirteet aiheuttavat dataan hajontaa, mikä vaikeuttaa energiatehokkuusmittareiden referenssiarvojen määrittämistä.

Rauman voimalaitoksella on ainutlaatuinen polttoaineen kuivuri, joka nostaa laitoksen omakäyttösähkönkulutusta merkittävästi. Laitoksen omakäyttösähkönkulutus on suurempi muihin CHP-laitoksiin verrattuna. Kuivurissa kuivataan kuoren ja lietteen seos. Seos kulkee viiraa pitkin, johon puhalletaan lämmintä ilmaa viiran läpi. Kuivurilla on positiivinen vaikutus laitoksen kokonaishyötysuhteeseen.

9. MONITOROINNIN TOTEUTUS

Tässä kappaleessa kerrotaan sovellusympäristön rakenteesta ja työkaluista, joilla energiatehokkuuden valvontasovellus on toteutettu. Sovellus on osa Metson käytönvalvontajärjestelmää, jonka tietoja käytetään hyödyksi. Kuvassa 9.1 on esitetty käytönvalvontasovellukset. Ne on ryhmitelty niiden käyttötarkoituksen mukaan 4 ryhmään, jotka ovat: tuotanto ja hallinta, suorituskyky ja kunto, ympäristöratkaisut sekä energianhallinta.

Monitoring concept for Power Plants



Kuva 9.1: Käytönvalvontasovellukset (Metso Automation 2012).

9.1. Sovellusympäristö

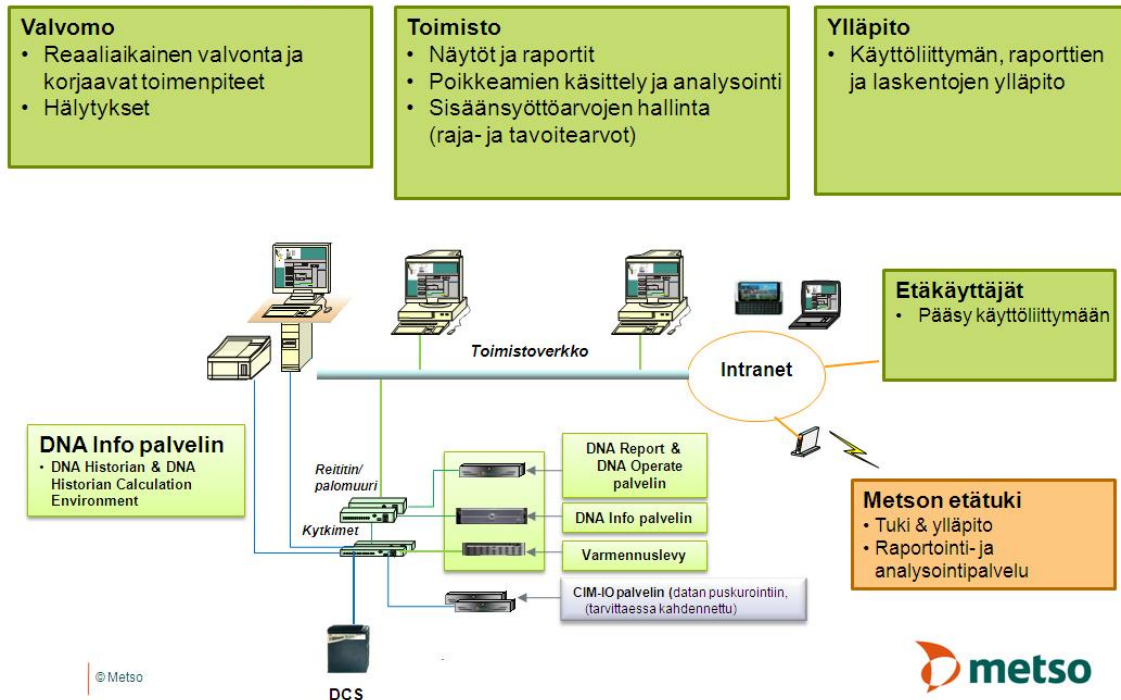
Nyky aikaisten voimalaitosten informaatiojärjestelmä kerää suuria määriä reaaliaikaista prosessidataa, jota hyödynnetään laskentojen suorittamiseksi. Informaatiojärjestelmällä voidaan seurata voimalaitoksen suorituskykyä, kuntoa, tuotantoa ja kulutusta. Laskentojen tulokset esitetään näytöissä ja raporteissa. Informaatiojärjestelmä ei tee säätöjä, mutta sen antamat tiedot (laskennat ja niiden ehdot) ovat tärkeässä roolissa laitoksen automaatiojärjestelmässä. Informaatiojärjestelmän web-pohjainen käyttöliittymä (DNA Report) on integroitu saumattomasti automaatiojärjestelmään (DNA Operate ympäristö). Automaatiojärjestelmästä saadaan helposti esille toimintavaliokko, mistä voidaan valita haluttu käyttöliittymän (DNA Report) toiminto.

Käyttöliittymä integroi tapahtumat (hälytykset), operoinnit, päiväkirjamerkinnot ja prosessidatan samaan trendiin tai raporttiin. Halutun toiminnon tai työkalun data haetaan automaattisesti (kuten trendin data, hälytykset ja tapahtumat sekä päiväkirjamerkinnot) historiatietokannasta. Laskentojen tulokset tallennetaan myös historiatietokantaan.

Web-portaali (Metso DNA Report) mahdollistaa prosessien ja ihmisten välisen vuorovaikutuksen. Se sisältää raportoinnin sekä analysointi- ja järjestelmätyökalut, jotka voidaan räätälöidä käyttäjäkohtaisesti. Web-portaalia käytetään verkkoselaimen avulla ja se hyödyntää kaikkea historiadataa, joka on tallennettu historiatietokantaan (Metso DNA Historian). Toimistokäyttäjät eivät tarvitse erillistä käyttöliittymäohjelmaa näyttöjen tai raporttien katsomiseen. DNA Report on raportointityökalu, jolla voidaan raportoida dataa monesta tietokannasta. Siinä on työkalut raportoinnin kehittämiseen, laskentoihin, trendeihin, hälytyksille ja tapahtumille, datan käsityölle sekä käyttäjäpäiväkirjalle. Web-portaalissa on valmiita työkaluja, joilla käyttäjä voi tehdä raportteja. Vaativimpien raporttien tekoon käytetään DNA Report Designer- ohjelmaa.

Informaatiojärjestelmä sisältää trendityökalun nimeltään DNA Tracer, joka mahdollistaa trendien analysoinnin. Käyttäjä voi hakea mittaustiedon tietokannasta ja tarkastella dataa trendimuodossa. Trendinäyttöön voi myös hakea useampia muuttujia, joita voi verrata keskenään. Trendejä käytetään usein häiriöiden syiden tarkasteluun. Tällöin tapahtuma- ja hälytyshistorian näkyminen samassa työkalussa on hyödyllinen ominaisuus. Trendityökalu soveltuu hyvin yleisen kehityksen seuraamiseen mittauksesta, jonka arvo vaihtelee paljon, mutta mittauksen mittausdatan trendi on nouseva tai laskeva. Näytöt antavat reaaliaikaista tietoa siitä, mitä laitoksella tapahtuu. Näyttöjä voi katsella myös historiatietojen pohjalta. Käyttäjän ei tarvitse olla valvomossa tietääkseen mitä laitoksella tapahtuu, koska näyttöjä voi katsella myös toimistossa. Näyttö voi olla yleisnäyttö tai siinä voi esittää jonkin prosessin osan kaikki arvot. Käyttäjä voi itse tehdä lisää näyttöjä tai muokata niitä mieleisekseen. Kuvassa 9.2 on esitetty energiatehokkuuden valvonta Metson informaatiojärjestelmässä ja siihen kuuluvat osa-alueet. Käyttäjät on jaettu valvomon käyttöhenkilökuntaan, toimistokäyttäjiin, ylläpitoon ja etäkäyttäjiin. Etäyhteydellä tarjotaan käyttöön liittyvää huoltopalvelua. (Metso Automation 2012)

Energiatehokkuuden valvonta Metso DNA informaatiojärjestelmässä



Kuva 9.2: Informaatiojärjestelmän toimintakaavio (Metso Automation 2012).

9.2. Sovelluksen toiminta

Energiatehokkuuden valvontasovelluksen määrittämisvaihe aloitettiin tutustumalla laitoksien komponentteihin ja prosesseihin. Sovelluksen taustalla on tehty laitokselle analysointia laitoksien erityispiirteistä ja energiatehokkuuden kannalta tärkeimmistä seurattavista suureista. Tämän jälkeen laadittiin energiatehokkuusmittarit. Pohjana on käytetty laitoksille laadittuja energiatehokkuuskaavioita (esitetty kappaleissa 10 ja 11). Mittareiden validoinnilla karsittiin kohteet, joihin ei löydetty selkeää vastetta. Suureita seurataan tietyssä toimintapisteessä tai tietyn suureen funktiona. Arvoille, joille ei löydy selittäviä tekijöitä määritettiin absoluuttiset raja-arvot. Arvot saattavat vaihdella eri tilanteissa esimerkiksi seisonta-ajan omakäyttösähkön tavoitearvo.

Datan analysointi perustuu historiatietojen arvoihin. Historiatiedoista valittiin ajanjakso, mikä huomioi laitoksen kaikki olennaiset ajotilanteet. Historiatietojen perusteella nähdään, miten laitos on käyttäytynyt tietyissä tilanteissa. Tällä tavalla nähdään laitoksen energiatehokkuuden parannuspotentiaali paremmin kuin käyttämällä pelkästään tiettyjä referenssiarvoja. Dataa on analysoitu Microsoft Excelillä, jonka perusteella on muodostettu sovitteet, käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää. Laskennoissa käytetään 1h keruusykyä. Tällä saadaan tasattua mittausten heilahtelua. Energiatehokkuusmittareiden ja sovitteiden muodostuksesta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 8. Laskennat on toteutettu Metson työkaluilla.

Sovelluksessa keskitytään normaaliajoon, alas- ja ylösajot jätetään huomioimatta, koska nämä ajat ovat kokonaisuuden kannalta merkityksettömiä. Normaaliajoon keskittymällä saadaan myös tarkkailtua mittareita luotettavammin. Normaaliajon lisäksi sovellus huomioi seisonta-ajan. Tämä on vähän käynnissä olevilla lauhdelaitoksilla olennainen seurattava suure. Energiatehokkuusmittareiden laskennat suoritetaan tiettyjen ehtojen mukaan (esimerkiksi laitoksen normaaliajo). Laskentojen suorittamiseen vaikuttavat laitokset tehotaso ja komponenttien käyntitiedot.

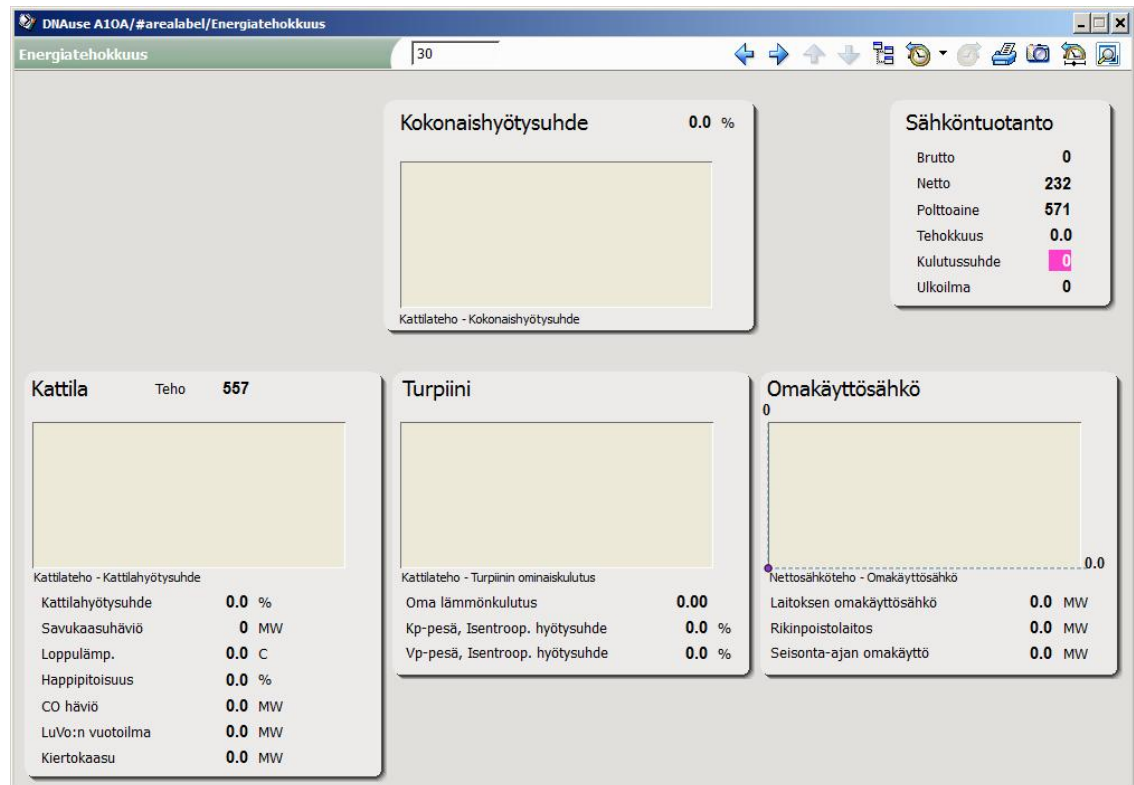
9.3. Käyttöliittymä

Käyttöliittymä sisältää energiatehokkuusnäytön sekä web-portaalin kautta saatavan raportin. Käyttöhenkilökunta voi syöttää parametrit syöttönäyttöjen (Metso DNA Entry) avulla. Järjestelmään syötetään käsin sellaiset tiedot, joita ei saada muista liittynnoistä tai joille ei löydy prosessimittausta.

9.3.1. Näyttö

Energiatehokkuusmittarin poikkeava arvo näytetään informaatiojärjestelmän valvontasovelluksessa värisymbolilla. Näytöstä nähdään myös seurattavan suureen tavoitealue. Toimintapistenäytöt ovat erittäin tärkeässä roolissa energiatehokkuuden valvonnan toteutuksesta, koska suureiden toimintapiste on pystyttävä havaitsemaan selkeästi. Koevaiheessa päätettiin, ettei automaatiojärjestelmään tehdä hälytyksiä. Viritysvaiheen jälkeen katsotaan tarpeellisten hälytysten lisääminen. Hälytysten määrä on rajallinen, jonka takia valinta pitää tehdä harkiten.

Näytöstä on mahdollisuus myös saada trendejä, joilla pystytään tarkkailemaan eri suureiden kehitystä. Seuraavassa kuvassa 9.3 on esitetty valvontanäytön päänäyttö, jonka lisäksi on vielä erillisiä yksityiskohtaisempia alanäyttöjä. Mikäli poikkeamia tulee liikaa, on käyttöhenkilökunnalla mahdollisuus muuttaa raja-arvoja käsisyötöllä. Tällä tavalla pystytään hakemaan laitoksen kannalta parhaat tavoitearvot.




Kuva 9.3: Tahkoluodon energiatohokkuussovelluksen päänäyttö

9.3.2. Raportit

Energiatohokkuuden valvontasovelluksen raporteissa näytetään laitoksen olennaisimmat mittarit tietyinä ajanjaksona. Ajanjaksoja ovat päivä, viikko, kuukausi ja vuosi. Raporteissa esitettävät energiatohokkuusmittarit riippuvat ajanjaksosta. Päivä raportissa esitetään tuntikeskiarvot, viikko- ja kuukausiraportissa päiväkeskiarvot ja vuosiraportissa kuukausikeskiarvot. Arvojen keskiarvojen poikkeamat näytetään raportissa punaisella värillä.

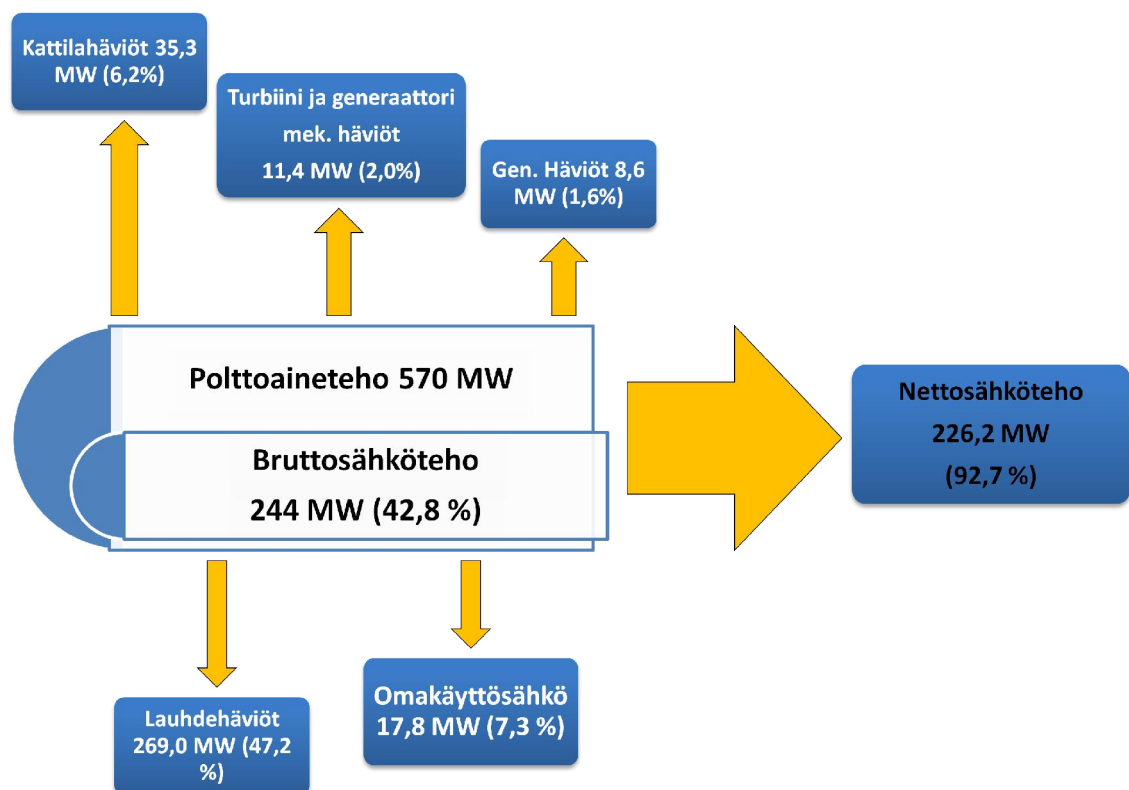
Raportilla saadaan havainnollinen kuva laitoksen toiminnasta. Sen ansiosta voidaan analysoida tapahtumia ja suunnitella parannuksia. Raportin avulla saadaan tieto pidemmän aikavälin muutoksista, joita olisi muuten vaikea huomata. Raportteja voidaan hyödyntää eri ajanjaksojen palaverissa. Seuraavassa kuvassa 9.4 on esitetty esimerkkiraportti.

Vuorokausiraportti								
toukokuu:2012 31.5.2012 0:00:00					31.5.2012			
	1H: T1NA00XU01L :ave Kattilan hyötysuhde - epäsuora %	NA00C016:av Laitoshyötysuh de %	1H: T1SA00XZ01L: ave Turbiinilaitokse n om.lämmönk. MW	T1NR10GP01L Savukaasu, lämpöhäviö MW	T1NH10GP01L Luvon vuotoilman mukana poist. MW	T1RA10T001T L KP-Höyry, lämpötila, tark C	T1RB11TT01T L Kuuma VT-Höyry, lämpötila, tark C	1H:T1BA22P8: ave ENERGIAMITT AUS OMAKÄYTT kW
00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00	0	0	0	0	0	0	0	0
09:00	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00	0	0	0	0	0	0	0	0
11:00	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00	0	-0,0040333	0	0	0	0	0	0
19:00	0	-0,008799927	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0

Kuva 9.4: Tahkoluodon energiatehokkuussovelluksen vuorokausiraportti

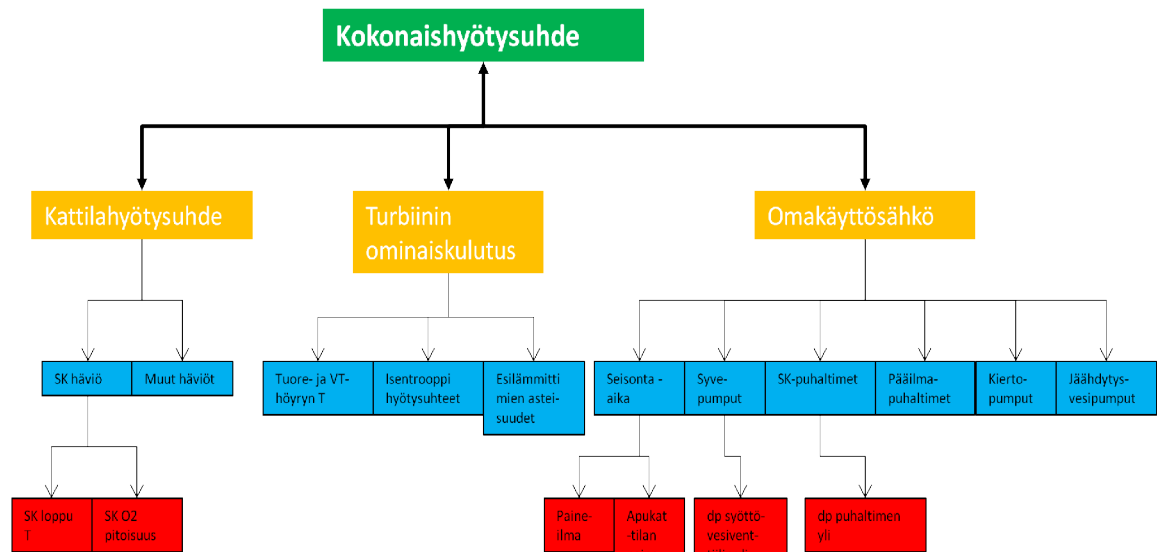
10. LAUHDEVOIMALAITOKSEN ENERGIATEHOKKUUDEN VALVONTA

Tässä kappaleessa käsitellään lauhdevoimalaitoksien energiatehokkuuden valvontaa ja kehittämistä. Case-laitoksena on kappaleessa 7 esitelty PVO-Lämpövoiman Tahkoluodon voimalaitos. Energiatehokkuuden kehittäminen aloitettiin laitokseen tutustumisella. Tutkimuksessa oli tavoitteena löytää laitoksen energiatehokkuuden kannalta merkittävimmät kohteet. Kuvassa 10.1 on esitetty Tahkoluodon Sankey-kaavio, josta voidaan nähdä laitokseen menevät ja tulevat energiavirrat. Energiatehokkuuden valvonnalla on tavoitteena saada vähennettyä häviöitä kuten: turbiinin ja generaattorin mekaaniset häviöt, kattilahäviöt sekä omakäyttösähkö.



Kuva 10.1: Tahkoluodon voimalaitoksen Sankey-kaavio (Zenger 1998).

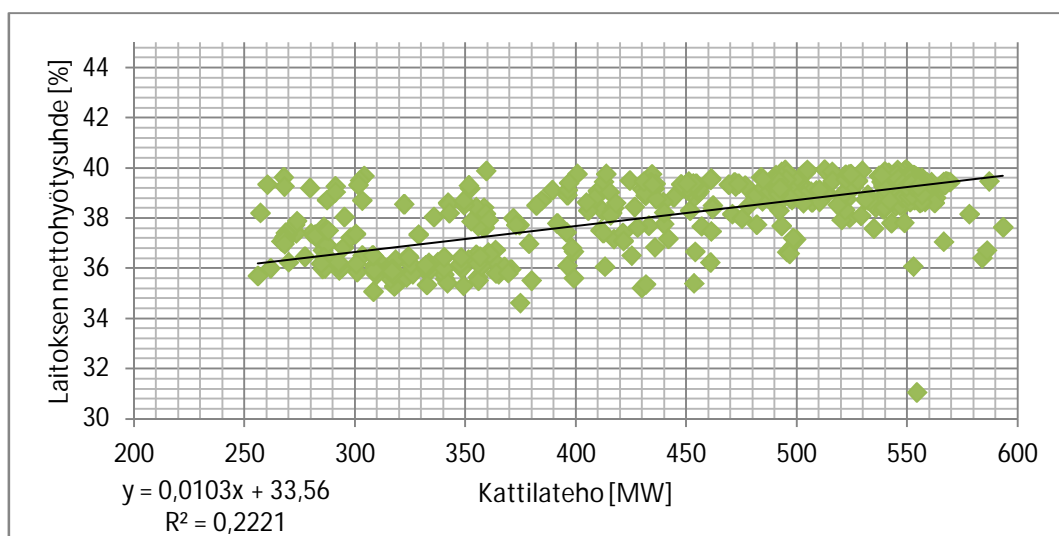
Lauhdelaituksen päämittarina on nettosähköteho. Toisen tason mittareina ovat kattilahiötysuhde, turbiinin ominaislämmönkulutus ja omakäyttösähkö. Kolmannessa tasossa ovat näitä selittävät suureet esimerkiksi: savukaasun loppulämpötila ja syöttövesipumpun sähköteho. Energiatehokkuusmittareiden rakennetta on kuvattu tiivistetysti kuvassa 10.2.



Kuva 10.2: Tahkoluodon voimalaitoksen energiatehokkuuskaavio

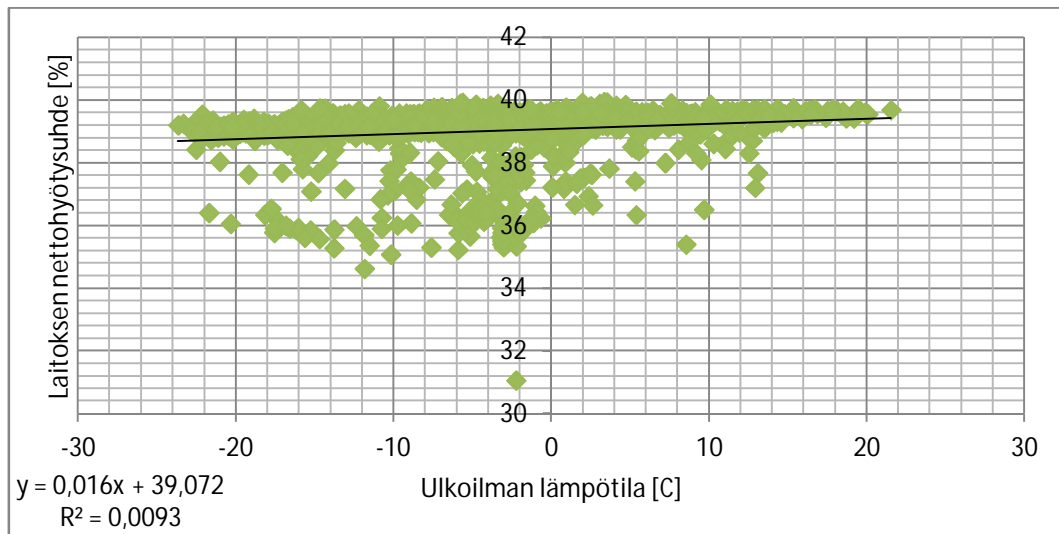
Lauhdelaiteilla polttoaine on usein suhteellisen tasalaatuista ja kuorman vaihtelut eivät ole suuria. Case-laitoksena olevaa Tahkoluodon voimalaitosta ajetaan yleensä täydellä teholla (252 MW) tai minimiteholla (100 MW), joka on helpottanut energiatehokkuusmittariston laatimista. Datan analysoinnissa on käytetty ajanjaksoa 16.1.2011 – 14.2.2012. Ajanjakso huomioi ulkoilman lämpötilan vaikutuksen, eri tehotasot ja seisonta-ajan. Kyseisenä aikana seisonta-aikaa on tullut erittäin paljon. Datasta on suodatettu normaaliajon ulkopuolinen osa.

Laitoksen kokonaishyötysuhdetta seurataan kattilatehon funktiona. Tarkastelussa on laitoksen nettohyötysuhde, jolloin pystytään seuraamaan paremmin hyödyksi saatavaa sähkötehoa.



Kuva 10.3: Laitoksen nettohyötysuhde kattilatehon funktiona.

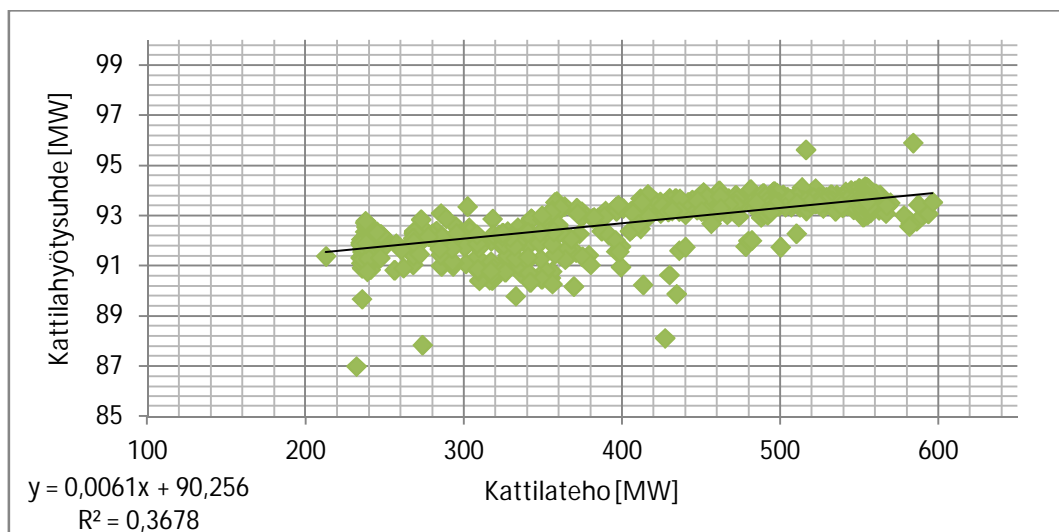
Ulkoilman lämpötilan vaikutusta on havainnollistettu seuraavassa kuvassa. Lämpötilalla on selkeästi vaikutus laitoksen hyötysuhteeseen, mutta suuren hajonnan vuoksi on hankala määrittää korjauskerrointa hyötysuhteelle.



Kuva 10.4: Laitoksen nettosähköteho ulkoilman lämpötilan funktiona.

10.1. Kattilahyötysuhde

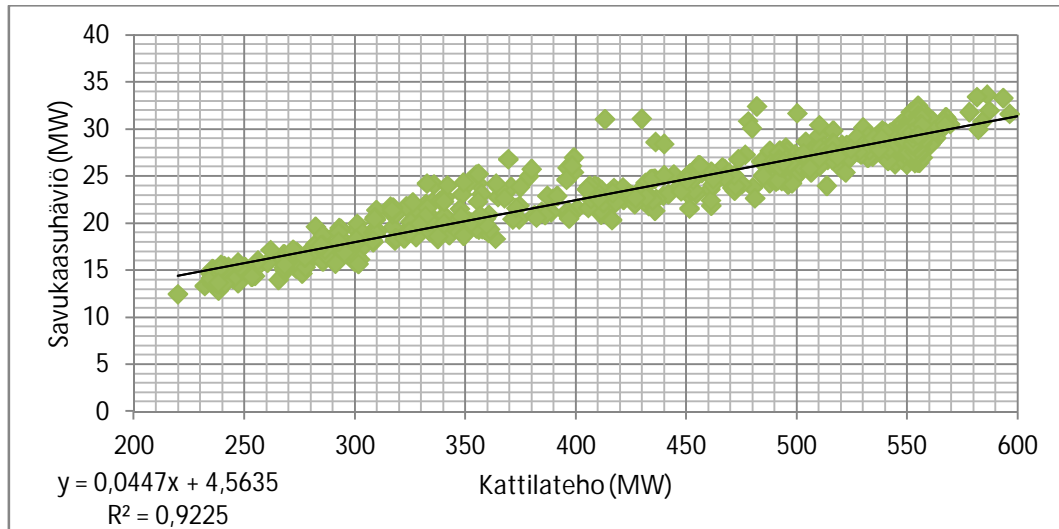
Kattilahyötysuhde lasketaan epäsuoralla menetelmällä kaavalla 5.5, jolla pystytään tarkastelemaan häviöitä tarkemmin. Hyötysuhdetta seurataan kattilatehon funktiona. Suurin häviö aiheutuu savukaasuhäviöstä. Savukaasuhäviötä seurataan myös kattilatehon funktiona. Muut häviöt CO-häviö, nuohoushäviö, säteily- ja konvektiohäviö, tuhkahäviöt, luvon vuotoilman lämpöhäviö ja kiertokaasuhäviöt ovat selkeästi pienempiä. Kattilahyötysuhteen muutosta aiheuttaa myös ulkoilman lämpötila, joka vaikuttaa vesihöyryn määrään kattilassa.



Kuva 10.5: Kattilahyötysuhde kattilatehon funktiona

10.1.1. Savukaasuhäviö

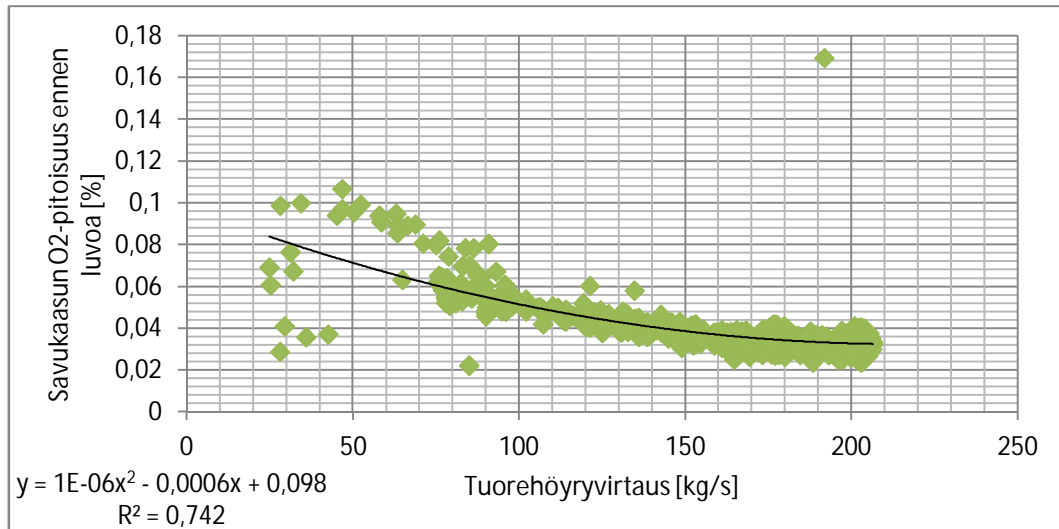
Savukaasuhäviöön vaikuttavat savukaasun loppulämpötila ja happipitoisuus. Savukaasun loppulämpötilan kohotessa kasvaa savukaasuhäviö, jolloin myös polttoaineen kulutus kasvaa tarpeettomasti. Syinä savukaasun lämpötilan kasvuun voivat olla joko kattilan likaantuneet lämmönsiirtopinnat (lämmönsiirto huononee) tai höyryluvon käyttö. Kuvassa 10.6 on esitetty savukaasuhäviön käyttäytyminen eri toimintapisteissä.



Kuva 10.6: Savukaasuhäviö kattilatehon funktiona.

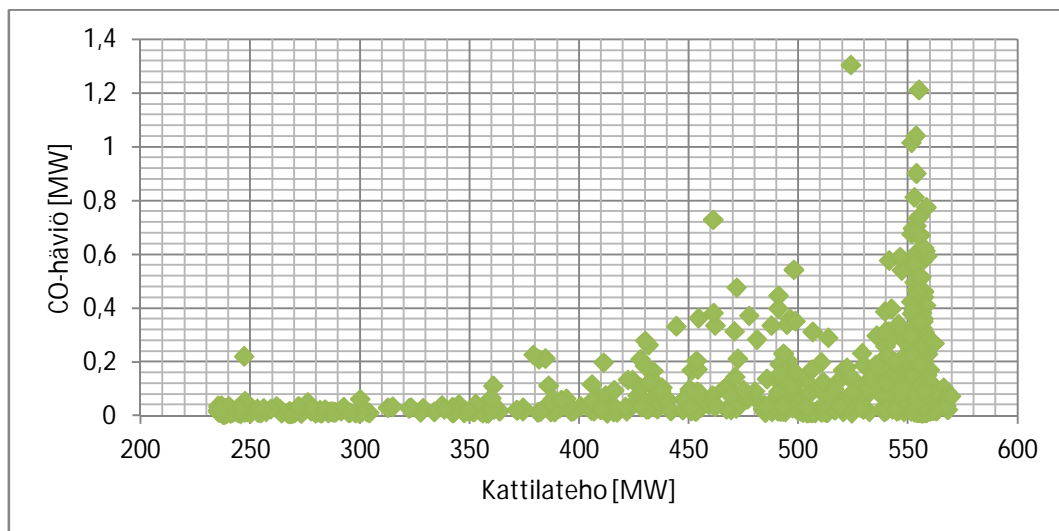
Savukaasun loppulämpötila on laskettu luvojen 1 ja 2 jälkeisen lämpötilan keskiarvona. Arvo ei ole täysin luotettava, koska luvojen läpi meneviä virtauksia ei tiedetä. Energiatohokkuuden valvonnan kannalta sillä ei ole merkitystä, koska tärkeintä on seurata arvon muutosta. Savukaasun loppulämpötila ei ole riippuvainen laitoksen kuorman tasosta, minkä takia sille on määritetty absoluuttinen ala- ja yläraja. Kattilan lämpöteho nousee, kun savukaasujen loppulämpötilaa voidaan alentaa. Rajana on kastepistelämpötila, jonka takia loppulämpötilalle on asetettava myös alaraja. Tahkoluodossa joudutaan käyttämään höyryluvoa käytännössä koko ajan, jotta savukaasun loppulämpötila pystytään pitämään tavoitteena olevan alarajan yläpuolella.

Savukaasun happipitoisuus ennen luvoa kertoo palamisen hyvydestä kattilassa. Mikäli happipitoisuus on liian matala, palaminen on epätäydellistä. Yleensä ongelmana on kuitenkin liian korkea savukaasun O_2 -pitoisuus, joka lisää savukaasuvirtaa ja siten kasvattaa savukaasuhäviöitä ja edelleen polttoaineen kulutusta. Tavoitteena on mahdollisimman pieni happipitoisuus, jolloin savukaasuhäviö saadaan minimoitua. Savukaasun happipitoisuutta seurataan savukaasumäärän funktiona ja mittaus suoritetaan ennen luvoa.



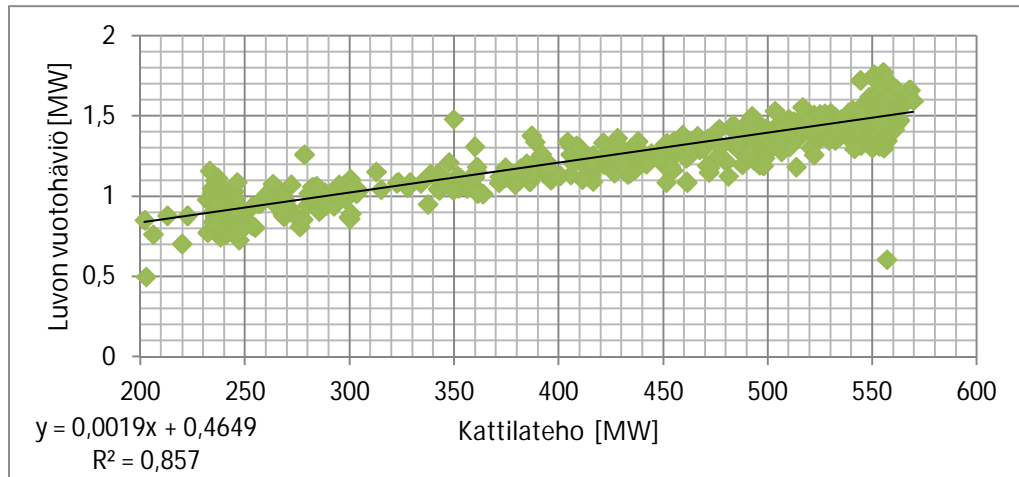
Kuva 10.7: Savukaasun happipitoisuus tuorehöyryvirtauksen funktiona.

CO-häviötä seurataan kattilatehon funktiona. Palamattomien hiilivetyjen häviöt ovat absoluuttisia häviöitä, joita ei pystytä hyödyntämään muualla. CO-häviön määrä on kuvan mukaan ollut suurella kuormalla erittäin vaihtelevaa, joka kertoo parannuspotentiaalista. CO-häviön määrään voidaan vaikuttaa säätämällä kattilan ilmakerrointa.



Kuva 10.8: CO-häviö kattilatehon funktiona.

Luvon vuotoilmahäviön seuraaminen on erittäin tärkeää, jotta vältetään luvon tukkeutuminen. Sitä seurataan kattilatehon funktiona. Luvon vuotoilman määrä määritetään happimittauksilla, jotka otetaan ennen luvua ja sen jälkeen. Luvon vuotoilman aiheuttamaa lämpöhäviötä tarkkaillaan kattilatehon funktiona. Luvon vuotohäviö lisääntyy suurilla kattilatehon arvoilla ja samalla myös hajonta kasvaa. Potentiaalia luvon vuotohäviön pienentämiseen on runsaasti.



Kuva 10.9: Luvon vuotohäviö kattilatehon funktiona.

Kiertokaasu kuvaa laskennallista savukaasumäärää, joka palautetaan kattilan tulipesän pohjalle. Sitä säädetään kuristuksella ja se lisää puhallintehoa. Kuristuksen säätö tapahtuu kiertokaasupuhaltimien jälkeen olevalla painemittauksella. Kiertokaasuhäviöön vaikuttaa välitulistimen nuohous. Välitulistimen säilyessä puhtaana tarvitaan vähemmän kiertokaasua. Kiertokaasulla säädetään myös VT-höyryn lämpötilaa.

Nuohouksen optimointi on erittäin merkittävässä asemassa laitoksen kannalta. Lämpöpintojen likaantumisella on monta vaikutusta, josta kerrottu enemmän kappaleessa (4). Nuohouksen tarpeesta kertoo esimerkiksi lämmönsiirtimien paine-eron kasvu. Painehäviön kasvaminen kertoo muun muassa tulistimen likaantumisesta. Sen vaste tulee kuitenkin niin pitkällä viiveellä, että yksittäisestä paine-eron muutoksesta ei voida tehdä vielä johtopäätöksiä. Tämän takia on seurattava pidemmän aikavälin (vuorokausi) paine-eron muutosta. Nopeammin poikkeamiin reagoiva mittari on lämmönsiirtokerroin (erittäin hyvä luvoilla), joka Tahkoluodon voimalaitoksella vaatii mittauksien lisäämistä.

Tahkoluodossa Gavon (savukaasujen jälkilämmitin) nuohouksen tarvetta voidaan tarkastella paine-eron muutoksen vuorokausikeskiarvolla ja tehdä sen perusteella mahdollinen nuohoussyklin muutos. Riskinä on kuitenkin Gavon tukkeutuminen ja laitoksen alasajo. Sovellus tarkastelee muutamia suureita, joilla pystytään optimoimaan nuohouksen tarvetta, mutta kattavampi lopputulos saadaan esimerkiksi Metson nuohouksen optimointisovelluksella.

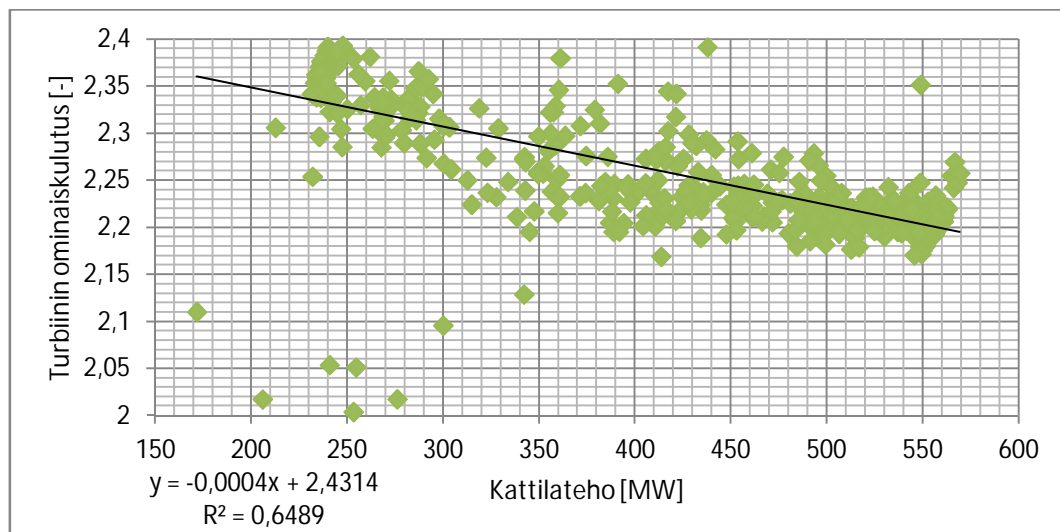
10.2. Sähköntuotannon tehokkuus

KP-höyryn arvot vaikuttavat suoraan höyryturbiinista saatavaan sähkötehoon. Sekä lämpötilan että paineen nousu lisäävät turbiinin sähkötehoa, jolloin sama sähköteho voidaan saavuttaa alemmalla polttoaineteholla. Lämpötilan ja paineen nousua rajoittavat turbiinin ja kattilan materiaalien lujuusominaisuudet, minkä vuoksi kattilan tehtävänä on tuottaa juuri sen lämpöistä ja paineista höyryä, että turbiinin ohjearvot saavutetaan. Seurattavina kohteina ovat KP- ja VT-höyryn lämpötilat, joissa on tavoitearvo. VT-

höyryn lämpötilaa pidetään halutulla tasolla säätämällä kiertokaasun määrää. Kiertokaasuhäviö suurenee, mutta samalla voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttava VT-höyryn lämpötila nousee. Höyryjen painetasoja ohjaa automaatio, eikä niihin pystytä vaikuttamaan tällä sovelluksella.

Turbiinin isentrooppista hyötysuhdetta seurataan KP- ja VP-pesältä. MP-pesän osalta ei suoriteta valvontaa, koska höyry on niin kosteaa, että isentrooppisen hyötysuhteen seuranta ei ole luotettavaa. KP- ja VP-pesän isentrooppisille hyötysuhteille on laadittu alaraja, jonka yläpuolella tulisi olla. Isentrooppiset hyötysuhteet eivät datan analysoinnin perusteella olleet riippuvaisia laitoksen tehotasosta. Muutokset isentrooppisessa hyötysuhteessa ovat yleensä erittäin hitaita. Isentrooppisten hyötysuhteiden seuranta on luotettavampaa suorittaa pesittäin kuin väliotosta väliottoon, koska pesän läpi kulkee suurempi tilavuusvirta.

Turbiinista saatava sähköteho riippuu lauhduttimen tyhjän paineesta. Mitatun paineen ja laitevalmistajien käyrästöjen avulla voidaan laskea menetetty sähköteho, mikäli ohjepainetta ei ole saavutettu. Tyhjän paineen ohjearvo lasketaan kahdella tavalla: käyrästön mukaisella, turbiinin poistohöyryvirtauksesta riippuvana optimiarvona sekä poistohöyryvirran ja jäähdytysveden lämpötilan määräämänä minimipaineena. Lauhduttimen tyhjän paine ei ole tässä työssä ollut valvottavana kohteena.



Kuva 10.10: Turbiinin ominaislämmönkulutus kattilatehon funktiona.

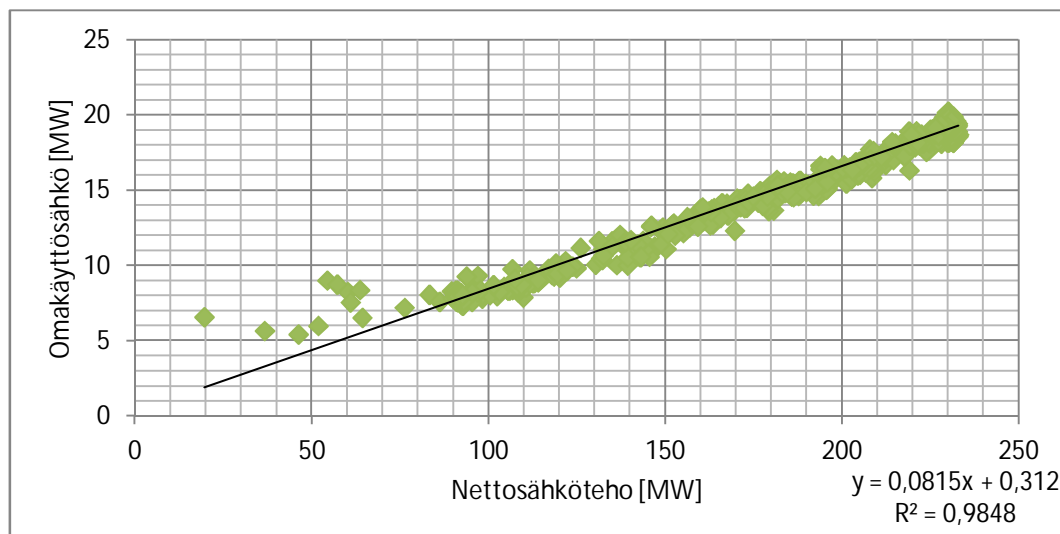
Kuvassa 10.10 on esitetty turbiinin ominaislämmönkulutus kattilatehon funktiona. Turbiinin ominaislämmönkulutus kuvaa sähköntuotantoon kulutetun lämmön (höyrytehon) ja sähkötehon suhdetta.

Tässä sovelluksessa ei toteutettu turbiinivakioiden seurantaa. Turbiinivakion avulla saadaan tieto siipien likaantumisesta sekä painetasojen muutoksesta. Tahkoluodon laitokselta löytyy turbiinivakioiden seuraamiseen vaadittavat mittaukset. Mittareiden validoinnin seurauksena se jätettiin kuitenkin pois.

Matalapaine- ja korkeapaine esilämmittimien sekä lauhduttimien seurannan kohteena ovat lämmönsiirtimien asteisuudet. Asteisuudet lasketaan lisäveden matalapaine-esilämmittimille (MP1, MP2, MP3), syöttöveden korkeapaine-esilämmittimille (KP5, KP6, KP7) ja lauhteen jäähdyttimille (KP5, KP6, KP7). Lauhteen jäähdyttimien asteisuudet eivät ole valvonnan kohteina. Mikäli lauhtuva höyry on tulistettua tai kosteasta höyrystä ei ole lämpötilamittausta, kyllästyslämpötila saadaan höyryn paineen funktiona. Referenssiarvojen määrittämisessä on käytetty Tahkoluodon voimalaitokselle tehtyä turbiinin kunnonvalvontamittauksia (05/2011) ja historiatietoja. Asteisuuksien arvot eivät ole riippuvaisia laitoksen tehotasosta, jonka takia niille on laadittu yläraja, jota ne eivät saa ylittää. Asteisuus on sitä parempi mitä alhaisempi sen arvo on.

10.3. Omakäyttösähkö

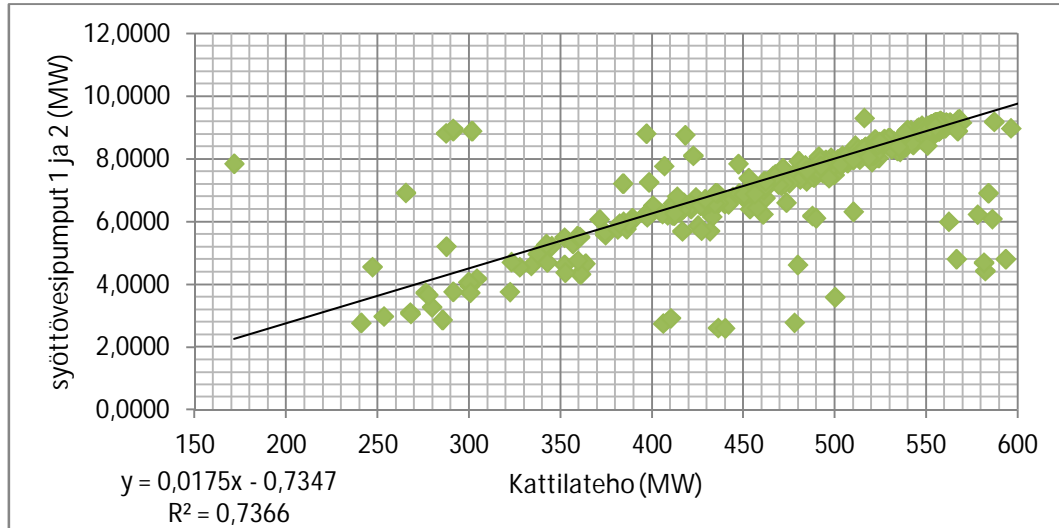
Laitoksen kokonaisomakäyttösähköä seurataan nettosähkötehon funktiona (kuva 10.11). Kyseistä mittaria kutsutaan myös omakäyttöhyötysuhteeksi. Nettosähköteholla saadaan mittarista parempi kuin bruttosähköteholla. Sovitteen korrelaatiokerroin on lähellä yhtä, joten sovite vastaa erittäin hyvin datajoukon arvoja. Komponenttien käyttöönotto aiheuttaa hyppäyksen omakäyttösähköön. Suurimmat hyppäykset aiheuttavat toisen syöttövesipumpun ja myllyjen käyttöönotto.



Kuva 10.11: Omakäyttösähkö nettosähkötehon funktiona.

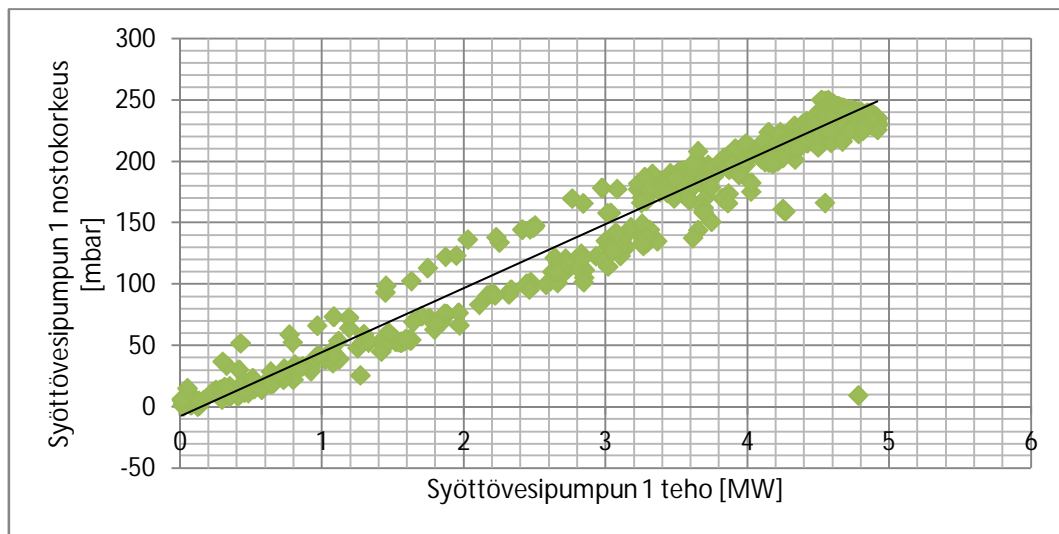
Omakäyttösähkön kulutuksessa huomioidaan laitoksen tärkeimmät pumput ja puhaltimet. Pumppujen ja puhaltimien hyötysuhteen online-seuranta sekä ominaisenergian kulutus kertovat niiden kunnosta sekä prosessin tilasta. Komponenttien tyhjäkäyntitehot kuluttavat merkittävästi sähköenergiaa vuositasolla. Tarpeettomien tyhjäkäyntitehojen poistaminen vähentää oleellisesti laitoksen omakäyttösähkön kulutusta.

Syöttövesipumpuilla (2 kpl) seurataan pumppujen yhteenlaskettua tehoa kattilatehon funktiona. Toinen pumppu käynnistetään teholla 155 MW, jonka takia on tehty kaksi eri sovitetta $P_{\text{brutto}} < 155 \text{ MW}$ ja $P_{\text{brutto}} \geq 155 \text{ MW}$. Kuvassa (10.12) ei ole jaettu sovitetta tehoalueisiin.



Kuva 10.12: Syöttövesipumppujen yhteenlaskettu teho kattilatehon funktiona.

Syöttövesipumppujen alamittarina on pumppukohtainen nostokorkeus pumpun tehon funktiona.



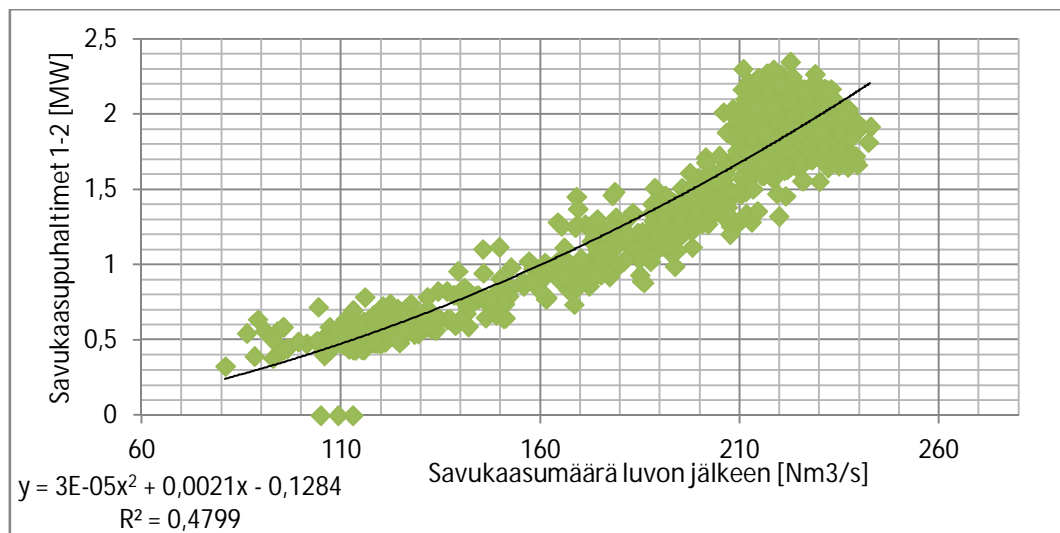
Kuva 10.13: Syöttövesipumpun 1 nostokorkeus pumpun tehon funktiona.

Lauhdepumpuilla paras seurattava mittari on pumppujen käyntitieto. Lauhdepumppuja on käynnissä aina vähintään kaksi ja kolmas pumppu otetaan käyttöön, kun päälahdevirtaus ylittää arvon 150 kg/s. Valvonnan kohteena on, että kolmas pumppu ei jää päälle päälahdevirtauksen ollessa alle 140 kg/s.

Pääjäähdytysvesipumppujen kohdalla oli tarkoitus optimoida jäähdytysveden määrää ja sitä kautta pyrkiä vähentämään pumppaustehoa. Tavoitteena on pitää jäähdytysveden määrä mahdollisimman pienenä ilman, että lauhduttimen tyhjä huononee. Jäähdytysveden määrä on suurin kesällä ja pienin talvella. Kylmän veden

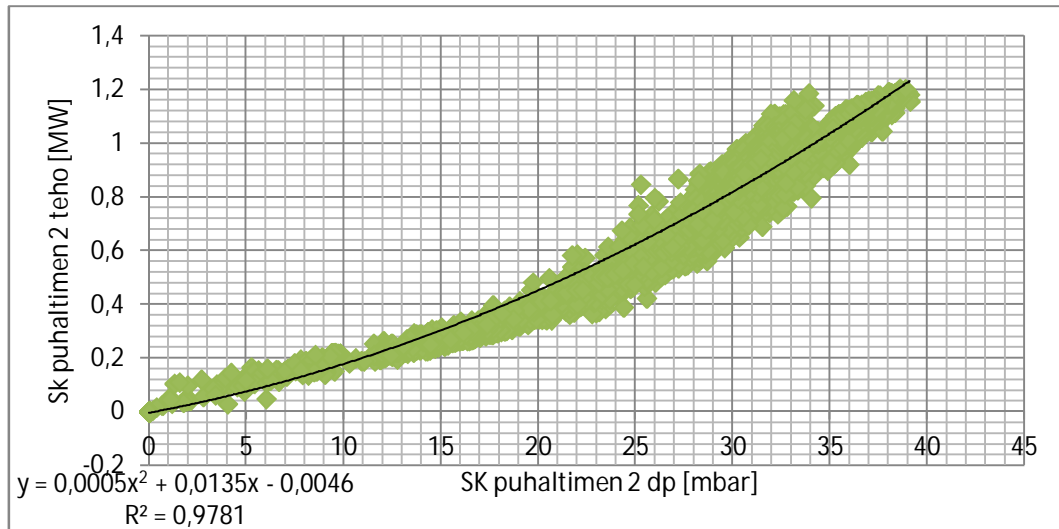
aikaan voitaisiin säätää lapakulmaa pienemmälle ja vähentää jäähdytysveden määrää. Ohjaavana suureena tarkastelussa voisi olla päälauhteen alijäähtyminen, joka tarkoittaa poistohöyryn lämpötilaa vähennettynä päälauhteen lämpötilalla. Luotettavan mittarin luominen tuotti kuitenkin ongelmia ja jäähdytysveden määrän käyttäytymistä tulisi tutkia kokeellisesti eri ajankohtina.

Savukaasupuhaltimien (2 kpl) kohdalla mittarina on puhaltimien yhteenlaskettu teho savukaasuvirtauksen funktiona. Savukaasuvirtaus mitataan luvon jälkeen. Puhaltimien tehoon vaikuttaa rikinpoistolaitos. Rikinpoistolaitoksen sammuttaminen aiheuttaa suuremman painehäviön ja savukaasupuhaltimet joutuvat tekemään enemmän työtä. Savukaasumäärää lisäävät polttoaineen lämpöarvo ja kosteus. Myös Luvon ilmavuoto nostaa savukaasupuhaltimien tehoa, koska puhaltimet joutuvat imemään vuotoilmaa.



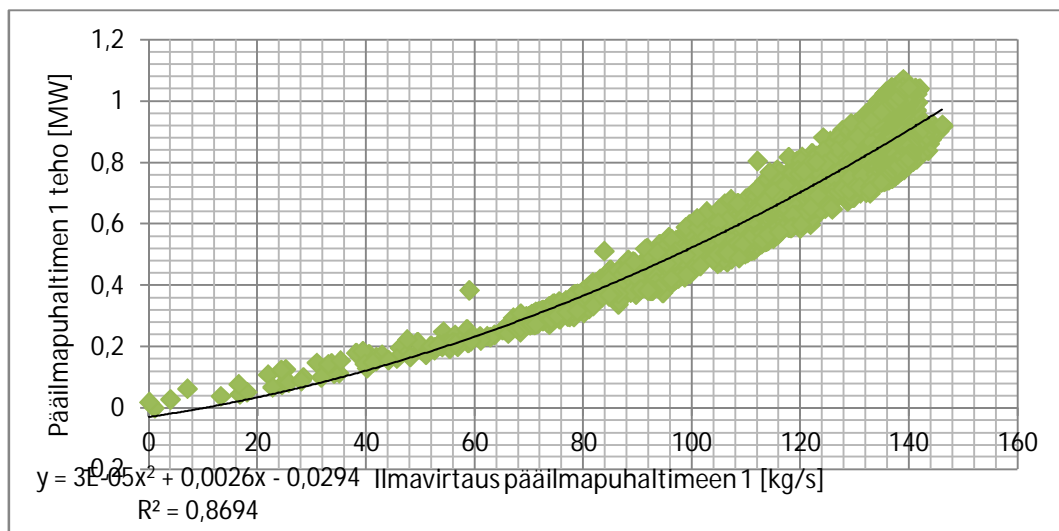
Kuva 10.14: Savukaasupuhaltimien 1 ja 2 teho savukaasuvirtauksen funktiona.

Savukaasupuhaltimien tehonkulutuksen alamittarina on puhallinkohtainen paine-ero puhaltimen tehon funktiona.



Kuva 10.15: Savukaasupuhaltimen teho savukaasun paine-häviön funktiona.

Pääilmapuhaltimilla (2 kpl) seurataan puhallinkohtaisesti puhaltimen tehoa palamisilmamäärän funktiona. Palamisilmamäärä tiedetään puhallinkohtaisesti. Palamisilmapuhaltimien tehon nousu saattaa aiheutua esimerkiksi luvon tukkeutumisesta. Luvon ilmavuodon seurauksena puhaltimien teho nousee ja ilmaa puhalletaan enemmän kuin on tarpeen. Kuvassa 10.16 on esitetty pääilmapuhaltimen 1 teho ilmavirtauksen funktiona. Sovitteen korrelaatio on kohtalaisen hyvä, vaikka suurilla virtauksilla tulee hajontaa enemmän.



Kuva 10.16: Pääilmapuhaltimen teho ilmavirtauksen funktiona.

Tahkoluodossa on 4 hiilimyllyä. Hiilimyllyjen yhteenlaskettua tehoa voidaan seurata laitoksen bruttosähkötehon funktiona. Vaihtoehtoisesti voidaan seurata myllykohtaisesti myllyn tehoa mitatun hiilimäärän funktiona. Myllyjen tehoon vaikuttavat ensisijaisesti kivihiilen jauhautuvuusindeksi ja hiilen kosteus. Myllyjen käytön optimointi saattaa aiheuttaa laitoksen alasajon, joten seuranta on oltava luotettavaa. Tietyllä tehoalueella on mahdollista tulla toimeen pienemmällä

myllymäärällä, mutta riskit on huomioitava. Tämän takia myllyjen kohdalla on toteutettu ainoastaan sähkötehon seuranta.

Rikinpoistolaitoksen sähkötehoa seurataan laitoksen omakäyttösähkötehon funktiona. Tällöin pystytään tarkkailemaan, että rikinpoistolaitoksen osuus pysyy halutulla tasolla. Rikinpoistolaitoksen kiertopumppujen (6 kpl) optimoinnissa ei voida käyttää ohjearvona kivihiilen rikkipitoisuutta, koska kivihiilen analysointi tapahtuu viiveellä. Parempi seurattava suure on rikkipitoisuus piipussa. Tässä ylärajana on päästöraja, jota ei saada ylittää. Tämän perusteella pystytään optimoimaan pumppujen käyttöä. Pumppuja on aina käytössä vähintään kaksi, jotta pystytään ylläpitämään tarvittavaa virtausta.

Laitoksen muu omakäyttösähkö saadaan laskettua vähentämällä kokonaisomakäyttösähköstä suurimmat pumpput, puhaltimet ja rikinpoistolaitos. Pumpuille ja puhaltimille, joille ei löydy tehomittausta voidaan laskea kaavalla 5.21 hetkellinen sähköteho.

10.3.1. Seisonta-ajan omakäyttösähkö

Tahkoluodon seisonta-ajan omakäyttösähkö pitäisi saada nopeammin halutulle tasolle. Tämän takia on määritetty kaksi tavoitearvoa, joihin vaikuttavat komponenttien käyttö. Seisonta-aikana omakäyttösähkön määrään vaikuttavat rikinpoistolaitos, apukattila ja vuodenaika. Rikinpoistolaitosta ei sammuteta samalla hetkellä kuin laitosta, joka näkyy selvästi korkeampana omakäyttösähkön kulutuksena. Rikinpoistolaitoksessa on monia suuria kuluttajia esimerkiksi: hapetusilmapuhaltimet, lietepumput ja painevesipumput. Apukattila tuottaa omakäyttölämmön seisonta-aikana. Mikäli Tahkoluodon vieressä oleva Meri-porin voimalaitos (Fortum) on Tahkoluodon seisonta-aikana ajossa, tuottaa se lämmön myös Tahkoluodolle. Fortum tuottaa lämmön Tahkoluodolle välillä myös molempien laitosten seisoessa. Apukattilan merkitys seisonta-ajan omakäyttösähköön on vain noin 0,05 MW. Tämä kulutus tulee apukattilan toimilaitteista kuten: syöttövesipumppu ja palamisilmapuhaltimet. Ulkoilman lämpötila vaikuttaa myös seisonta-ajan omakäyttösähkön kulutukseen, mutta myös sen merkitys on varsin pieni.

Energiatehokkuuden seurannassa ovat myös seisonta-ajan paineilma ja apukattilan paine. Apukattilan paineelle on määritetty seisonta-aikana raja-arvo, jota ei saa ylittää. Paineilmalla on raja-arvo, mutta käytännössä työaikana (8 – 16) tuo arvo saatetaan välillä joutua ylittämään.

10.4. Ilmanvaihto ja lämmitys

Sovellukseen ei otettu mukaan ilmanvaihdon tai omakäyttölämmön seuranta. Tämä olisi vaatinut investointeja, joiden kannattavuuteen ei otettu työssä kantaa. Turbiinirakennus on kesällä kuuma ja kattilarakennus talvella kylmä. Turbiinirakennuksesta olisi mahdollista syöttää lämpimämpää ilmaa kattilarakennukseen, jotta hyödynnettäisiin sen lämpöenergia. Tähän vaikuttavat monet muuttujat: kattilan käyntitieto, ulkoilman ja sisäilman lämpötila, turbiinisalin ja

kattilarakennuksen paine-ero sekä ulkoilman paine. Turbiinisali ei saa olla alipaineinen. Tämän takia pelkkä siirtokone ei riitä vaan tarvitaan myös tuloilmakone. Tuloilmakoneilla pitäisi varmistaa turbiinirakennuksen oikea painetaso. Kattilarakennuksen korvausilmapuhaltimia voitaisiin optimoida niiden käyntitietojen perusteella. Korvausilmamäärän optimoinnissa ongelmia aiheuttaa muun muassa sulkupeltien puuttuminen ilma-aukosta.

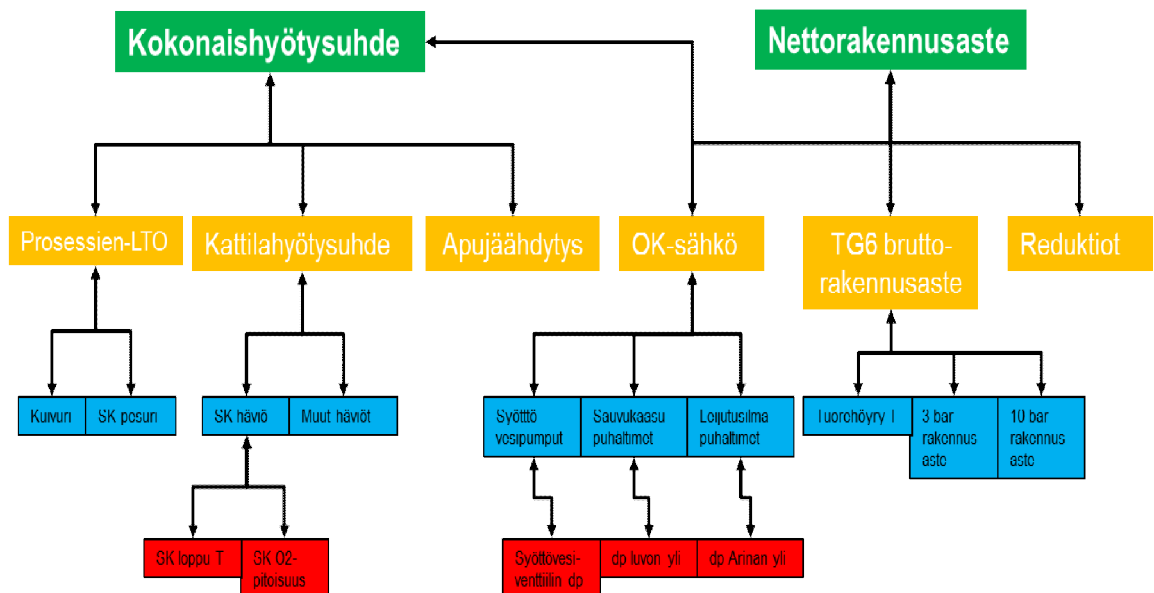
Valaistuksen optimoiminen vaatii, että se olisi jaoteltu omaan ryhmään. Aikakytkimellä olisi mahdollista säätää automaattisesti eri tilojen valaistuksen määrää, ajankohdan mukaan. Uusien mittausjärjestelyiden lisäys on mietittävä laitoskohtaisesti.

10.5. Johtopäätökset ja jatkokehitys

Tahkoluodon laitoksella saatiin määritettyä olennaisimmat energiatehokkuusmittarit. Laitoksen vähäinen käyntiaika aiheutti ongelmia testauksessa. Testaus suoritettiin vanhoilla arvoilla ja siinä huomioitiin eri ajotilanteet. Mittareiden vaste oli tavoitteen mukainen ja jatkossa on keskityttävä virittämään ne lopulliseen muotoon. Kaikkia mittareita ei saatu tutkimuksesta huolimatta tehtyä luotettavasti ja ne jätettiin mittareiden validoinnissa sovelluksen ulkopuolelle. Jäähdytysveden määrän, rikinpoistolaitoksen lietepumppujen määrän sekä nuohoussyklin optimoiminen on mahdollisuus lisätä sovellukseen myöhemmin. Kehitettävänä kohteena on myös lämmönsiirtokertoimien määrittämiseen vaadittavien mittausten lisääminen.

11. CHP-LAITOKSEN ENERGIATEHOKKUUDEN VALVONTA

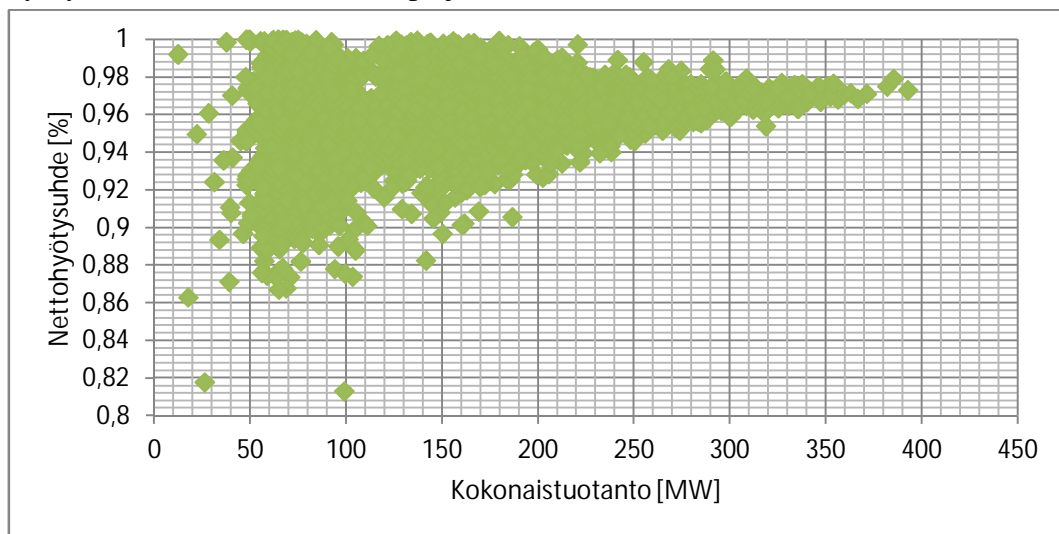
Tässä kappaleessa käsitellään CHP-laitosten energiatehokkuuden valvontaa ja kehittämistä. Case-laitoksena on Rauman Voiman voimalaitos, joka on esitelty tarkemmin kappaleessa (7). Seuraavassa kuvassa 11.1 on esitetty CHP-laitoksen energiatehokkuuden kaavio, jossa päämittarit ja alamittarit sekä niitä selittävät suureet. Päätasolla on kokonaishyötysuhde ja nettorakennusaste. Seuraavalla tasolla on lämmöntalteenotto, kattilahiötysuhde, turbiinin isentrooppiset hyötysuhteet, omakäyttösähkö, rakennusaste, apujäähditys ja reduktiot. Kolmannella tasolla tarkastellaan näitä selittäviä suureita ja edelleen neljännellä tasolla kolmatta tasoa selittäviä tekijöitä. Kaavioon ei ole yksinkertaistamisen takia laitettu kaikkia kolmannen ja neljännen tason suureita. Kaaviosta on myös poistettu mittareiden validoinnin yhteydessä osa niistä mittareista, joiden seuraaminen ei energiatehokkuuden valvontasovelluksella ole luotettavaa. Rauman Voiman kohdalla ei ole tämän työn aikana toteutettu energiatehokkuuden valvontasovellusta. Työssä tehtiin ainoastaan energiatehokkuussovelluksen määrittelyvaihe. Tämän takia tässä kappaleessa ei käsitellä kaikkia osa-alueita koko laajuudessa (lämmöntalteenotto ym.).



Kuva 11.1: Rauman voimalaitoksen energiatehokkuuskaavio

Rauman Voiman nettohyötysuhteen seuranta ei ole sisällytetty valvontasovellukseen. Kaavan 5.1 mukaan siihen vaikuttavat lämpötuotteet (sähkö, kaukolämpö ja höyry) ja polttoainetehto. Monia erilaisia polttoaineita hyödyntävillä

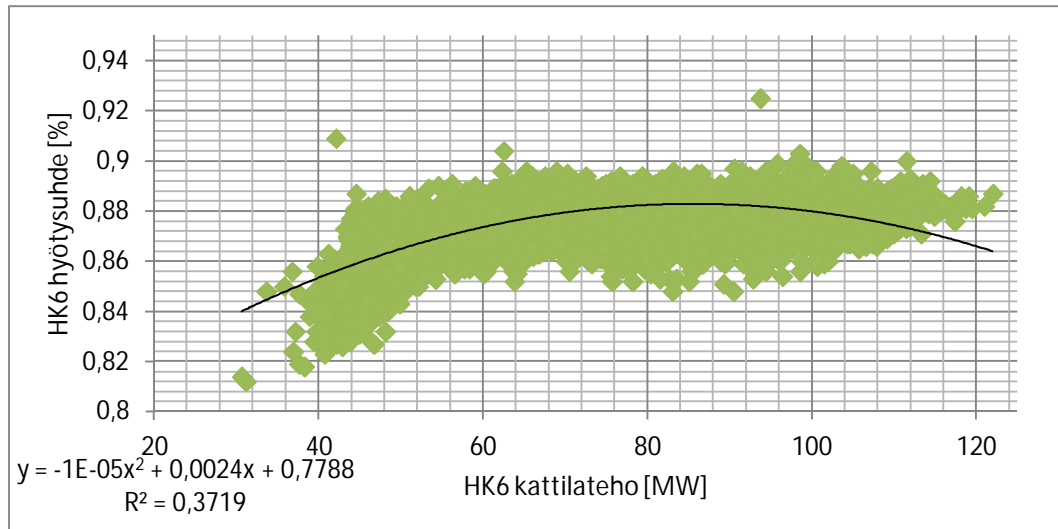
laitoksilla ei ole tarkkaa tietoa, mitä polttoaineita poltetaan ja miten paljon. Tästä aiheutuu liian pieni polttoainetehon arvo ja kokonaishyötysuhteelle on hankalaa löytää toimintapisteestä riippuvaisia tavoitearvoja. Myös suuret kuorman vaihtelut aiheuttavat ongelmia energiatehokkuusmittareiden tarkastelussa. Häiriötekijöitä aiheuttavat myös polttoaineiden laatuvariaatiot (esimerkiksi kosteus, josta lisää kappaleessa 4) ja mittausten luotettavuudesta. (enemmän kappaleessa (2.4)). Rauman polttoainetehon laskenta perustuu polttoainekuljettimien nopeuksiin. Nettohyötysuhdetta ei lasketa kattilataseen kautta, joka aiheuttaa polttoainetehon laskentaan epätarkkuutta. Kattiloiden ajotapa vaikuttaa myös laitoksen nettohyötysuhteeseen. Kuvasta 11.2 on nähtävissä, että hyötysuhteen arvot vaihtelevat paljon.



Kuva 11.2: Laitoksen nettohyötysuhde kokonaistuotannon funktiona

11.1. Kattilahyötysuhde

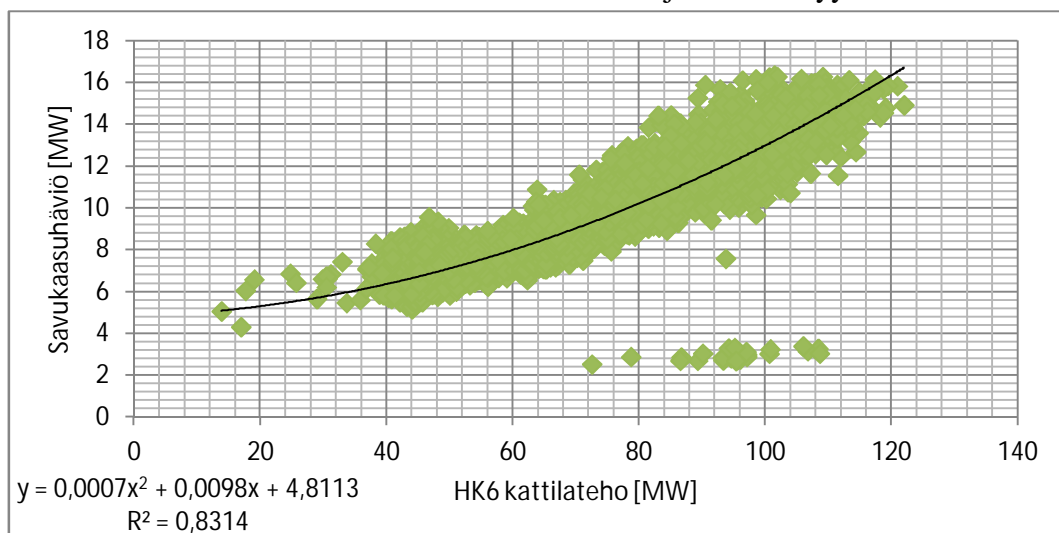
Kattilahyötysuhdetta seurataan kattilakohtaisesti kattilatehon funktiona. Seurannassa keskitytään kiinteän polttoaineiden kattiloihin HK5 ja HK6. Kattilahyötysuhde määritetään epäsuoralla menetelmällä kaavalla 5.5. Kattilahäviöihin vaikuttaa eniten savukaasuhäviö. Muiden häviöiden osuus kattilahäviöistä on selvästi pienempi. Höyrykattilan HK5 epäsuoraa hyötysuhdetta ei pystytä määrittämään tarkasti, koska kattilan taselaskenta puuttuu. Kattilahyötysuhteeseen vaikuttavista tekijöistä on kerrottu myös lauhdevoimalaitoksen energiatehokkuuden valvonnan yhteydessä (kappale 10). Kuvassa 11.3 on esitetty HK6 hyötysuhde kattilatehon funktiona.



Kuva 11.3: HK6 hyötysuhde kattilatehon funktiona.

11.1.1. Savukaasuhäviö

Savukaasuhäviötä seurataan kattilatehon funktiona ja se lisääntyy kuorman kasvaessa.

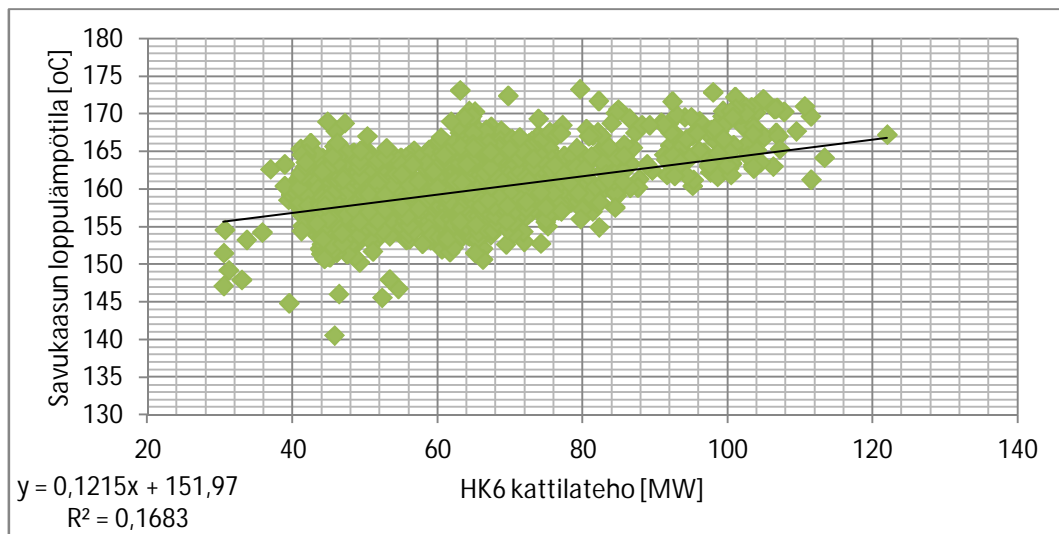


Kuva 11.4: Savukaasuhäviö HK6 kattilatehon funktiona.

Kuvan 11.4 HK6 savukaasuhäviössä on havaittavissa suuri hajonta kattilatehon arvoilla noin 100 MW. Kuvaajan mukaan nähdään potentiaaliset hyvät arvot, joihin tulisi päästä. Savukaasun loppulämpötila ja happipitoisuus (kuvat 11.5 ja 11.6) eivät kerro savukaasuhäviön hajontaa. Savukaasuhäviötä ei pystytä HK5 osalta määrittämään taselaskennan puuttumisen takia. Molempien kattiloiden osalta löytyy tarvittavat mittaukset savukaasun loppulämpötilan ja savukaasun happipitoisuuden määrittämiseksi, jotka vaikuttavat eniten savukaasuhäviöön. Tässä kappaleessa analysoidaan ainoastaan HK6 savukaasuhäviöön vaikuttavia selittäviä suureita.

1) Savukaasun loppulämpötila

Savukaasun loppulämpötilaa yritetään pitää ajoteknisesti mahdollisimman alhaalla, jotta savukaasuhäviö pysyy mahdollisimman pienenä. Savukaasun loppulämpötilaan voidaan vaikuttaa ajoteknisesti höyryluvojen ja kp-esilämmitimien käytöllä. Loppulämpötilaan vaikuttavat: savukaasumäärä, savukaasupuolen lämpöpintojen lämmönsiirto, palamisilman lämpötila höyryluvon jälkeen sekä syöttöveden lämpötila kp-esilämmittimien jälkeen. Polttoaineen kosteus vaikuttaa myös savukaasun kosteuteen ja loppulämpötilaan. Seuraavassa kuvassa 11.5 on esitetty savukaasun loppulämpötila kattilatehon funktiolla.

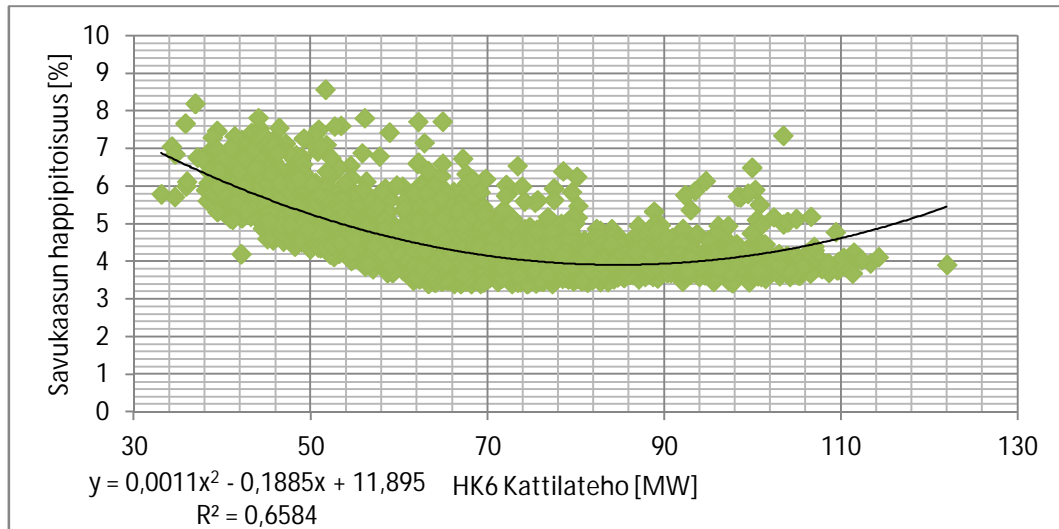


Kuva 11.5: Savukaasun loppulämpötila HK6 kattilatehon funktiona.

HK6 savukaasun loppulämpötila vaihtelee pienillä kuorman arvoilla selkeästi enemmän kuin suurilla ja korrelaatiokerroin on kohtalaisen huono. Testauksen perusteella pitää selvittää, onko parempi laatia absoluuttiset raja-arvot, jotka eivät ole riippuvaisia toimintapisteestä.

2) Savukaasun happipitoisuus

Savukaasun happipitoisuutta seurataan kattilatehon funktiona. Jäännöshappipitoisuus pyritään saamaan mahdollisimman alhaiseksi, jolloin voidaan säästää polttoainetta. Siihen voidaan vaikuttaa ilmakerrointa säätämällä. Kuvasta 11.6 voidaan havaita, että happipitoisuus on monella tehoalueella turhan korkea.

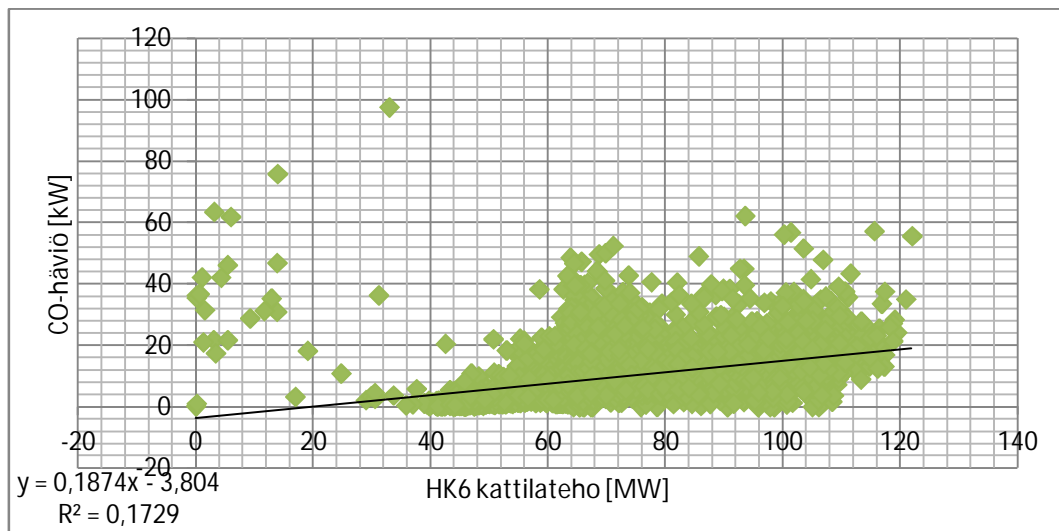


Kuva 11.6: Savukaasun happipitoisuus HK6 kattilatehon funktiona.

Savukaasun happipitoisuuden säätö toimii HK6:lla suhteellisen hyvin, eikä happipitoisuuden vaikutus näy selkeästi savukaasuhäviössä. Happipitoisuus on tärkeä seurattava suure, johon on selkeä vaikutusmahdollisuus.

11.1.2. Palamattomien häviöt

Seuraavassa kuvassa 11.7 on esitetty CO-häviö kattilatehon funktiona. Häviön merkitys on marginaalinen suhteessa savukaasuhäviöön.



Kuva 11.7: CO-häviö HK6 kattilatehon funktiona.

CO-häviö vaihtelee suhteellisen paljon tehoalueella 60 – 100 MW, kuten kuvasta 11.7 huomataan. CO-häviöön pystytään vaikuttamaan kattilan ilmakertoimen säädöllä ja ilmanjaolla. Ilmanjako vaikuttaa palamisilman tunkeutuvuuteen ja sekoittumiseen. Leijupoltossa palamislämpötila vaikuttaa CO-häviön muodostumiseen. Tämän takia selittävänä tekijänä olisi hyvä seurata myös palamislämpötilaa.

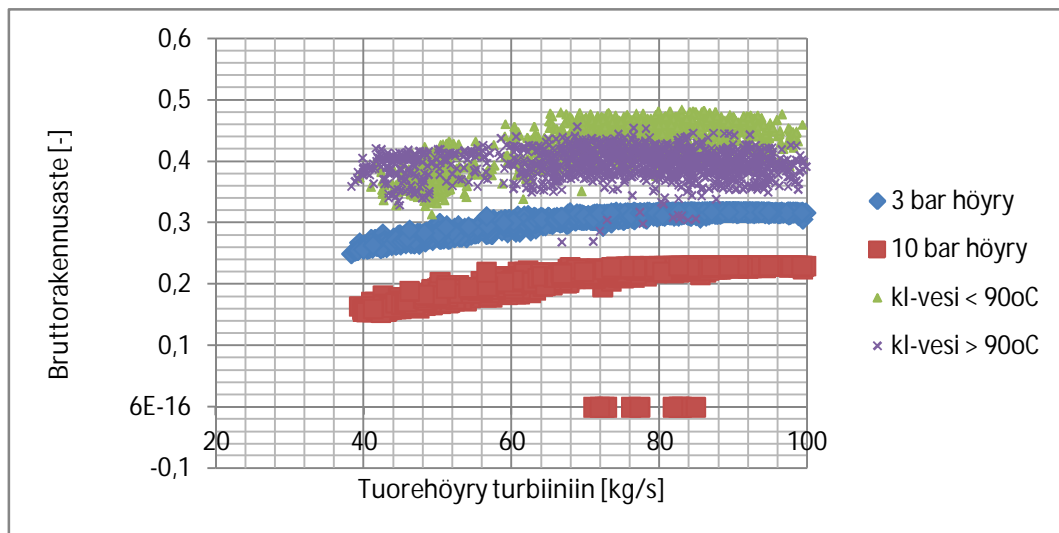
11.2. Turbiinilaitos

Turbiinilaitoksen häviöitä ei pystytä nykyisillä mittauksilla tutkimaan riittäväällä tarkkuudella. Tämän takia turbiinin isentrooppisen hyötysuhteen, ominaiskulutuksen ja turbiinivakion seuranta ei ole toteutettu Rauman laitoksella.

Ajotapojen optimoinnilla pystytään vaikuttamaan reduktioiden ja apujäähdetyksen käyttöön. Reduktioiden kohdalla pyritään minimoimaan turbiinin ohittaminen, käyttämällä kattilakapasiteettia oikeassa järjestyksessä. Tällöin vältetään turhat reduktioajat. Reduktioiden mittarina on reduktion osuus kokonaislämmöntuotannosta kattilalaitoksen tehon funktiona.

11.3. Rakennusaste

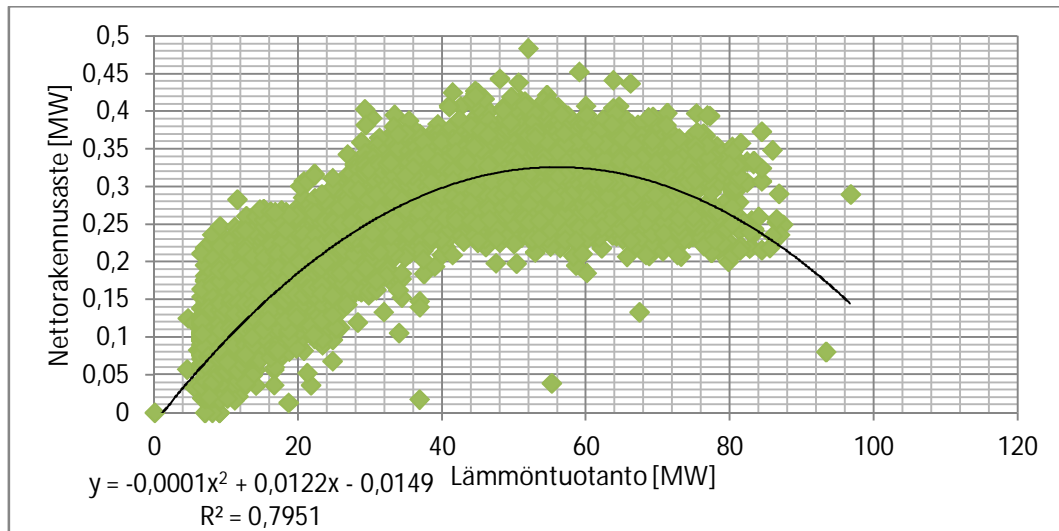
Rakennusasteen seurannassa tarkastelu jaetaan osiin. Turbiinin (TG6) bruttorakennusastetta seurataan kaukolämpötehon funktiona. Toinen seurattava mittari on turbiinin kaukolämmöntuotannon osuus kaukolämmöntuotannosta. Kaukolämmönrakennusastetta seurataan kaukolämpötehon funktiona. Turbiinin kaukolämpöosan rakennusaste kerrotaan sähkötehon korjauskertoimella ja muodostetaan tavoitekäyrä, jonka valvonnassa huomioidaan ulkoilman lämpötilan vaikutus. 3 bar ja 10 bar höyryjen rakennusasteen tavoitekäyrä muodostetaan sähkötehon korjauskertoimen avulla.



Kuva 11.8: Höyrytuotteiden bruttorakennusasteet turbiiniin menevän tuorehöyryn virtauksen funktiona.

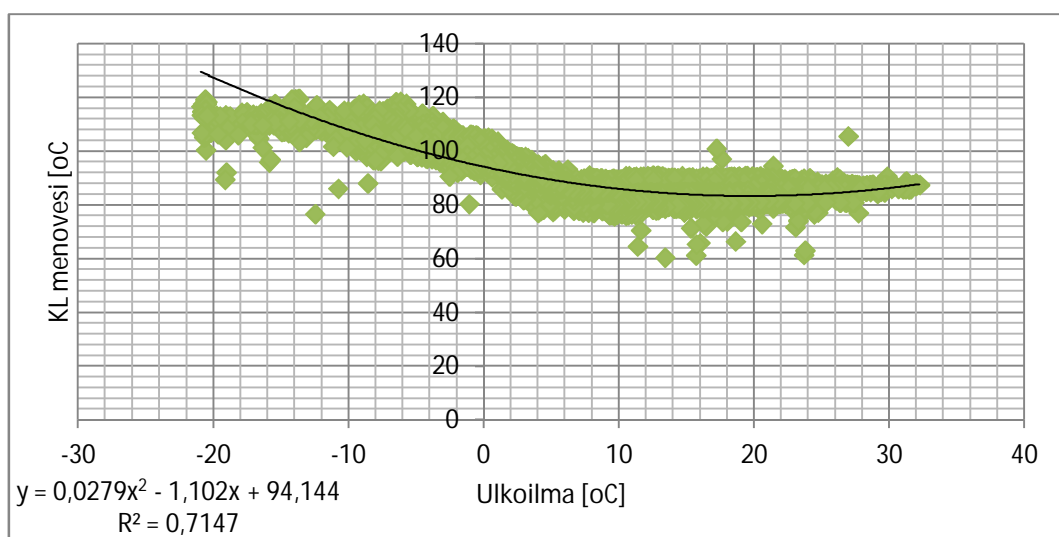
Kuvassa 11.8 on esitetty 3 bar ja 10 bar höyryjen rakennusaste sekä kaukolämmön rakennusaste. Kaukolämmön rakennusasteen datajoukko on jaettu kaukolämmön lämpötilan mukaan kahteen ryhmään. Kuvasta nähdään, että kaukolämmön lämpötilan korkeampi arvo huonontaa selkeästi kaukolämmön rakennusastetta.

Rakennusasteeseen vaikuttavat sisäisen kierron kuluttajat. Näitä ovat esimerkiksi syöttövesisäiliö sekä 3 bar ja 10 bar höyryjen kuluttajat. Jos syöttövesisäiliöön tulee enemmän lisävetä, höyryn määrä kasvaa ja sähköntuotanto nousee. Kp-esilämmittimellä lämmitetään syöttövetä. Tämä vaikuttaa myös sähköntuotantoon, koska se on jatkuvasti käytössä. Sisäisen kierron kuluttajille voidaan määrittää tavoitearvo kattilan lämpötehon funktiona. Myös asteisuuden seuranta on hyödyllinen seurattava kohde kp-esilämmittimillä.



Kuva 11.9: Turbiinin kaukolämpöosan rakennusaste kaukolämmöntuotannon funktiona.

Kuvassa 11.9 on esitetty laitoksen nettorakennusaste lämmöntuotannon funktiona. Datajoukon hajonta on samanlainen eri kuorman arvoilla, jonka takia mittari saadaan luotettavammaksi. Ongelmia sovitteen raja-arvojen määrittämiseen aiheuttaa kuorman vaihtelut.



Kuva 11.10: Kaukolämmön menoveden lämpötila ulkoilman lämpötilan funktiona.

Kaukolämmön menovedelle annetaan asetusarvo ulkoilman lämpötilan funktiona. Kuvasta 11.10 voidaan havaita, että keskimääräinen kaukolämmön

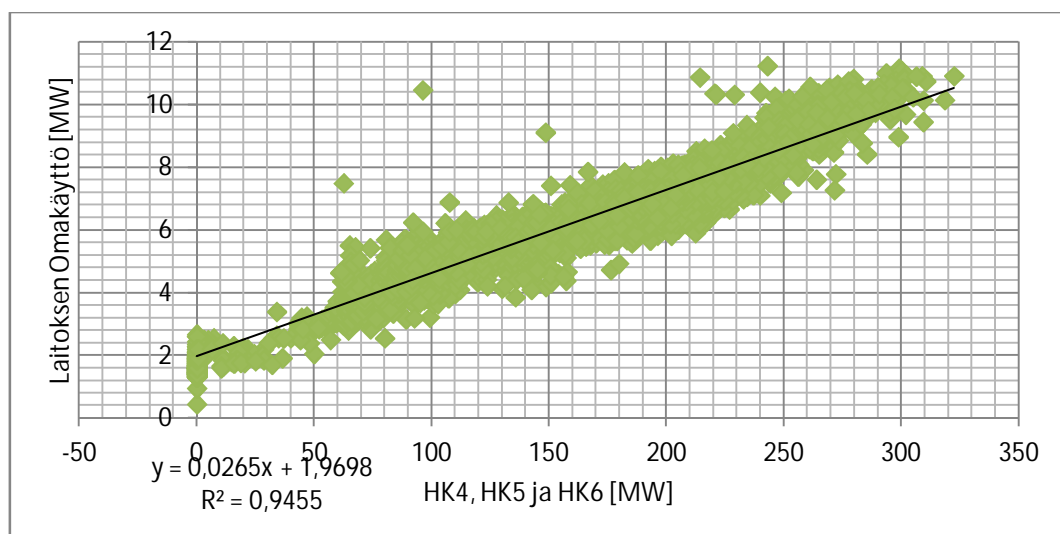
menoveden lämpötila vaihtelee 40 asteella (talvella) ulkoilman lämpötilan mukaan. Kaukolämmön menoveden matalampi lämpötila parantaa laitoksen hyötysuhdetta, koska höyry paisuu turbiinissa enemmän. Menoveden ja paluueden lämpötiloilla on kuitenkin ala- ja yläraja, jotka määräävät lämpötilojen asetusarvon. Kaukolämmön paluulämpötilaan vaikuttavat verkon mitoitus, ajotapa ja kuluttajan lämmityslaitteiden mitoitus.

11.4. Omakäyttösähkö

Rauman Voiman omakäyttösähkön tarkastelu on tärkeässä asemassa laitoksen kannalta. Laitoksen omakäyttösähkön seurannan avulla saadaan tietoa laitteiden toiminnasta ja prosessien optimoinneista, joihin pystytään vaikuttamaan ajoteknisesti. Ongelmia omakäyttösähkön määrittämisessä aiheuttivat mittauksien puuttuminen HK6:lta. HK5:llä mittauksia on oleellisimpien kuluttajien osalta riittävästi. HK6 omakäyttösähkön tarkastelu on kuitenkin vastaava HK5 kanssa, joten seurattavat suuret saadaan esitettyä. Tärkeimpien puhaltimien ja pumppujen ulkopuolella jää vielä iso osa omakäyttösähkön kulutuksesta. Näitä on mahdollisuus seurata kokonaisuutena ja tutkia sen käyttäytymistä kokonaisomakäyttösähkön funktiona.

Voimalaitoksen kattilat HK5 ja HK6 ovat käytössä suurimman osan vuodesta ja pysähtyvät vain kesäseisokin ajaksi. Siksi voimalaitoksen omakäyttösähkön käyttö on lähinnä käyntiajan kulutusta. Seisonta-aikaista kulutusta voimalaitoksella ei ole kesäseisokkia lukuun ottamatta. Seisonta-ajan seurantaan on mahdollisuus lisätä toimilaitteiden käyntiaikojen seurantaa, jolla pystytään valvomaan turhien laitteiden päälläoloa.

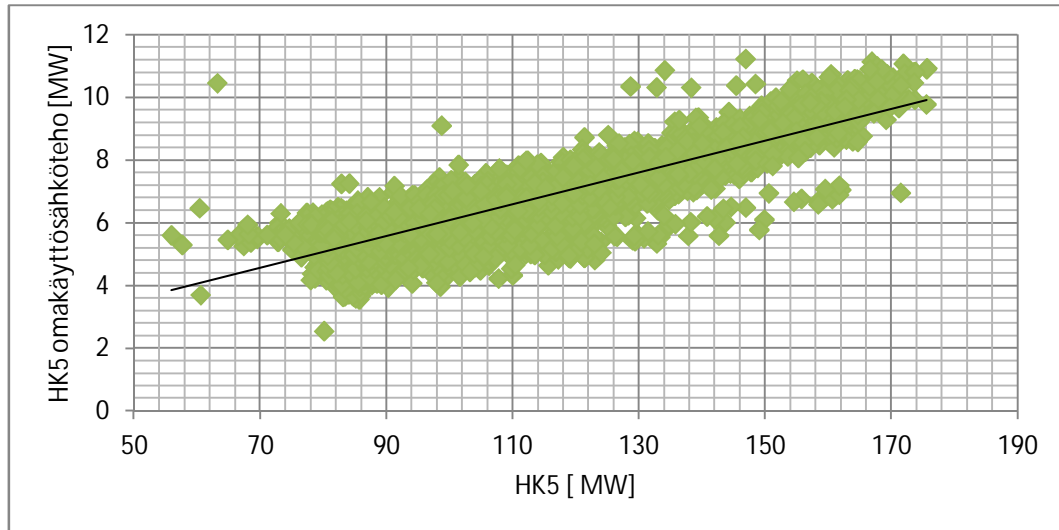
Seuraavassa kuvassa on esitettyä laitoksen kokonaisomakäyttösähkö kattiloiden (HK4, HK5 ja HK6) yhteenlaskettujen nettolämpötehojen funktiona.



Kuva 11.11: Laitoksen omakäyttösähkäteho kattiloiden yhteenlaskettujen nettolämpötehojen funktiona.

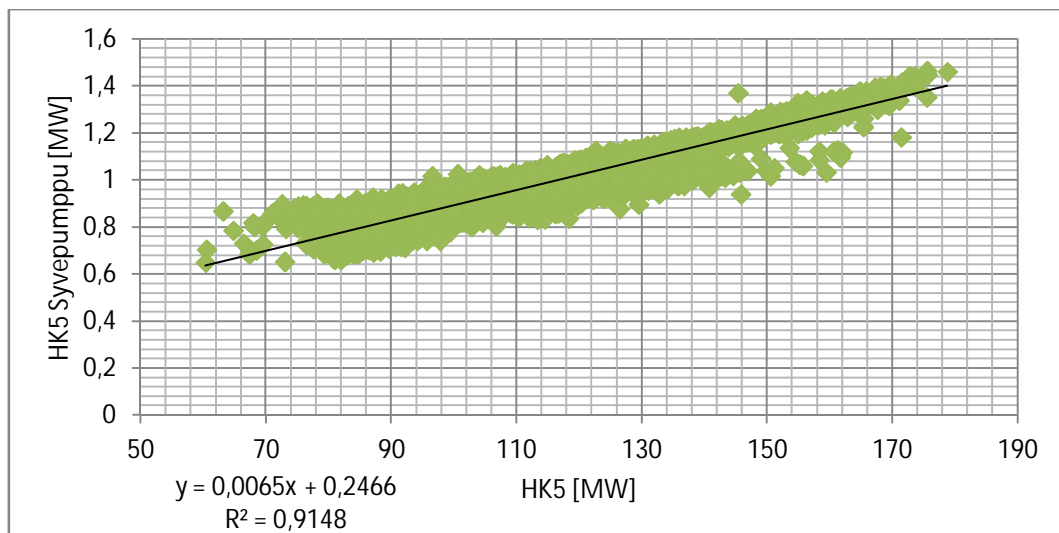
Omakäyttösähkön kulutuksen kasvu on lähes lineaarinen kattiloiden nettolämpötehojen kasvaessa. Pumppaus – ja puhallinprosessit kuluttavat merkittävän osan laitoksen omakäyttösähköstä. Paine-erojen kasvu lisää puhaltimien ja pumppujen tehontarvetta.

Seuraavassa kuvassa esitettynä on HK5 omakäyttösähkö HK5 nettolämpötehon funktiona.



Kuva 11.12: HK5:en omakäyttösähkäteho kattilan nettolämpötehon funktiona.

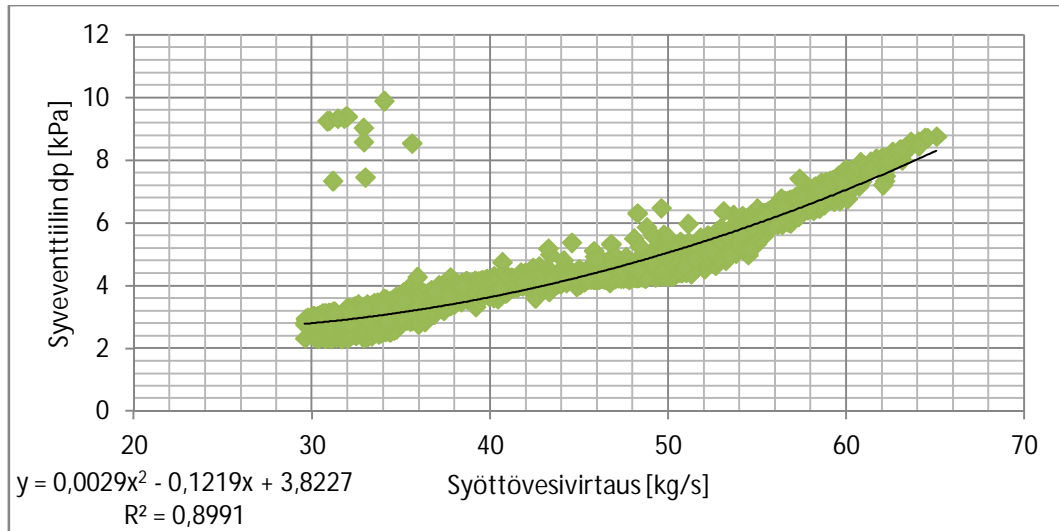
Kuvaajan 11.12 perusteella voidaan havaita, että HK5:en datan hajonta on suurempaa pienemmillä kattilatehon arvoilla.



Kuva 11.13: HK5 syöttövesipumpun teho kattilan nettolämpötehon funktiona.

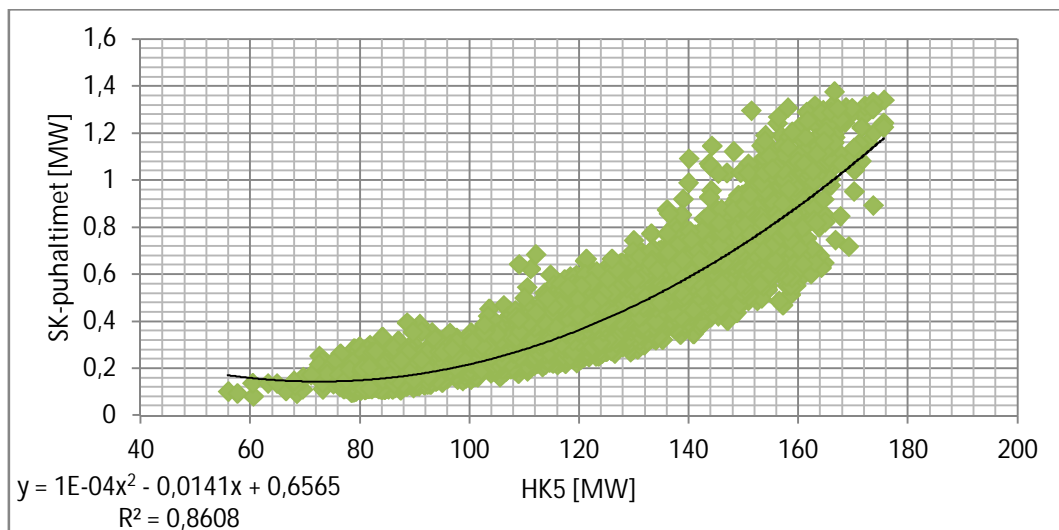
HK5 syöttövesipumppua 2 (taajuusmuuttajakäyttöinen) voidaan seurata syöttövesivirtauksen tai nettolämpötehon funktiona. Kuvaajat eivät eroa merkittävästi toisistaan. Syöttövesipumpun alamittareina ovat paine-ero syöttöveden säätöventtiilin yli (kuva 11.14), paine-ero ekonomaiserin yli sekä paine-ero tulistimien yli. Näitä kaikkia voidaan seurata syöttövesivirtauksen funktiona. Paine-ero säätöventtiilin yli on tärkein, koska se kertoo turhasta kuristuksesta. Kuristuksella voidaan nostaa kattilan

painetta putkistoon nähden. Paine-eroon voidaan vaikuttaa säätötekniisesti parantamalla lieriön pinnansäätöä. Syöttövesipumppua 1 käytetään vain tilanteessa, jossa vaihdetaan pumppua. Käytännössä ajetaan yhdellä pumpulla. Toista syöttövesipumppua ei saada seurantaan ja sen sähkötehon mittaustietojen lisääminen on eräs omakäytösähkön kehityskohde. Syöttövesiventtiilin painehäviö syöttövesivirtauksen funktiona on kuvan 11.14 perusteella luotettava alamittari syöttövesipumpulle.



Kuva 11.14: HK5 syöttövesiventtiilin painehäviö syöttövesivirtauksen funktiona.

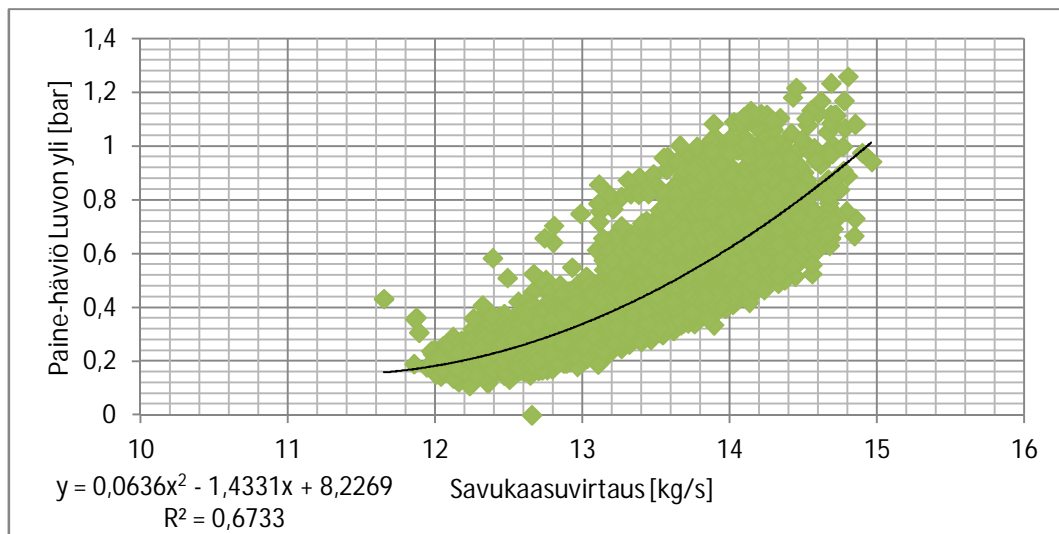
Kuvassa 11.15 on HK5:en savukaasupuhaltimien yhteenlaskettu teho nettolämpötehon funktiona. Sovite on kohtalaisen hyvä, mutta suurilla tehoilla havaitaan suurempaa tehon vaihtelua.



Kuva 11.15: HK5:en savukaasupuhaltimien yhteenlaskettu teho kattilan nettolämpötehon funktiona.

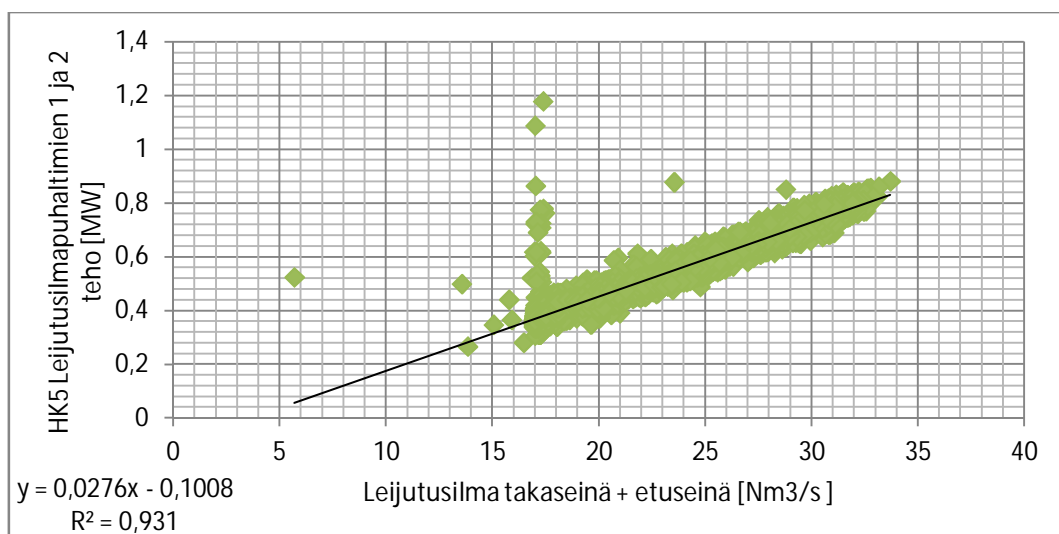
Alamittareina savukaasupuhaltimilla ovat savukaasupuolen painehäviöt savukaasuvirtauksen funktiona sekä savukaasun jäännös O₂-pitoisuus nettolämpötehon

funktiona. Savukaasupuhaltimen sähkötehon nousu voi aiheutua siitä, että savukaasupuolen painehäviöt ovat kasvaneet savukaasukanavan tukoksien seurauksena. Tulistimien tukkeutumat näkyvät myös savukaasupuhaltimien omakäyttötehon nousuna. Alamittarina voidaan seurata tulistimien, ekonomaiserin tai luvon paine-eroja. Paine-erojen kasvaessa vaikutusmahdollisuudet ovat pienet, koska tukkeutumia on vaikea saada enää nuohoamalla pois. Jäännöshappipitoisuus kertoo palamiseen käytettävän ilmaylimäärän oikeasta määrästä. Ilmaylimäärä ja jäännöshappipitoisuuden kasvaessa savukaasumäärä kasvaa, joka lisää puhaltimien tehoa. Savukaasumäärään vaikuttavat myös polttoaineen kosteus ja vuotoilmat. Ilmaylimäärään on mahdollisuus vaikuttaa ajoteknisesti.



Kuva 11.16: HK5 Luvon painehäviö savukaasuvirtauksen funktiona.

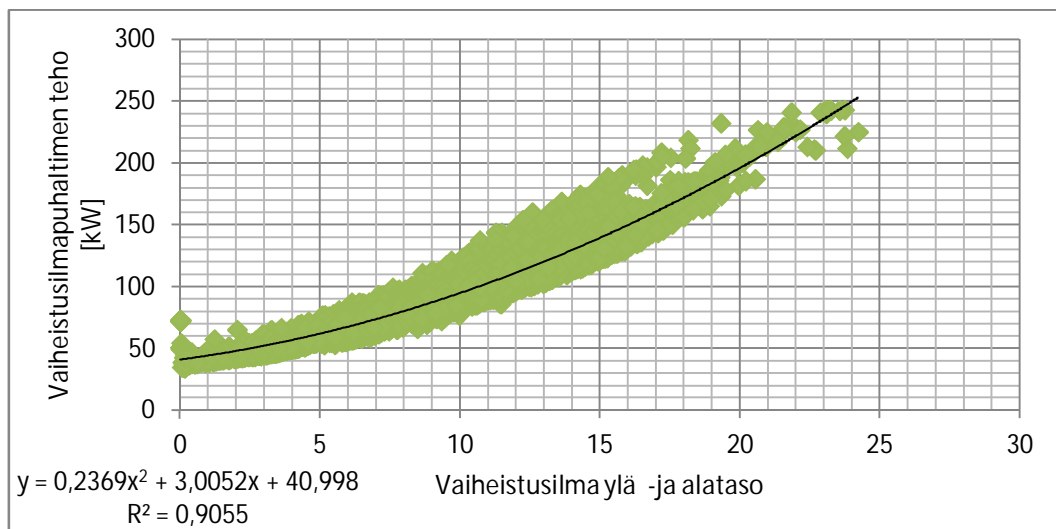
Kuvan 11.16 luvon painehäviö savukaasuvirtauksen funktiona oli ainut alamittari, joka mittareiden validoinnin jälkeen säilytettiin. Ekonomaiserin ja tulistimien painehäviöiden perusteella ei saatu luotettavaa mittaria savukaasupuhaltimien teholle.



Kuva 11.17: HK5 leijutusilmapuhaltimien teho yhteenlasketun leijutusilman funktiona.

Leijutusilmapuhaltimien yhteenlaskettua tehoa seurataan takaseinän ja etuseinän yhteenlasketulla leijutusilmamäärällä. Alamittarina voidaan seurata arinan painehäviötä leijutusilmamäärän funktiona. Painehäviö kertoo arinan tukkeutumisesta.

Vaiheistusilma varmistaa tehokkaan loppuunpalamisen ja sen määrää säätämällä on mahdollista vaikuttaa päästöihin ja lämpötilatasoihin. Vaiheistusilmapuhaltimen tehoa seurataan kattilan lämpötehon funktiona. Alatason mittarina on savukaasun jäännöshappipitoisuus kattilan lämpötehon funktiona, johon pystytään vaikuttamaan ajoteknisesti. Kuvassa 11.18 on esitetty vaiheistusilmapuhaltimen teho ylä – ja alatason yhteenlasketulla vaiheistusilmamäärän funktiona.



Kuva 11.18: Vaiheistusilmapuhaltimen teho yhteenlaskettujen vaiheistusilmamäärien funktiona.

11.5. Johtopäätökset ja jatkokehitys

Rauman kohdalla löytyy kehitettäviä kohteita esimerkiksi mittauksien ja HK5 taselaskennan lisääminen. Tämä vaikeutti myös laitoksen energiatehokkuuden määrittämistä. Tavoitteena on, että laitoksen energiatehokkuutta pystytään seuraamaan mahdollisimman luotettavasti. Laitoksen nettohyötysuhteen tarkempi seuranta vaatii polttoainetehon laskennan kattilataseen kautta epäsuoralla menetelmällä. Rauman kohdalla taselaskentaa ei ollut määritetty toiselle kattilalle, eikä tämän työn aikana kyseistä parannusta ollut mahdollista toteuttaa. Rauman kehitettäviä kohteita ovat myös HK6 omakäyttösähkötehon pääkuluttajien mittausten lisääminen vastaavasti kuin ne ovat toteutettu HK5:llä. Myös turbiinimittauksia on lisättävä Rauman laitoksella, jossa tavoitteena on turbiinin isentrooppihyötysuhteiden ja häviölaskennan luotettava määrittäminen. Rakennusastelaskentaa varten on myös lisättävä mittauksia, jotta pystytään vertaamaan eri ajopisteitä polynomisovitteiden tuottamiin tietoihin.

Laitoksen kaukolämpöpumppuja ei ole huomioitu valvontasovelluksessa, vaikka ne ovat paljon energiaa kuluttavia pumppuja. Mittarina olisi mahdollista käyttää

kaukolämpöpumppua kaukolämmöntuotannon funktiona. Alamittarina on kaukolämmön pumppausteho voimalaitoksen painehäviön funktiona.

Rauman voimalaitoksella polttoaineiden käsittely kuluttaa paljon energiaa. Seurannassa voisi olla tieto, paljonko murskattu tonni kuluttaa energiaa kuukausitasolla. Se myös kertoisi murskaimien kunnosta.

Lämmöntalteenottoa ei tässä työssä ole käsitelty. Kuivurin osalta huomioitavia kohteita ovat kuivurin haihdutusteho, kuivurin sähkötehon suhde haihdutustehoon ja kuivurin haihdutustehon suhde lämmöntalteenottoon. Myös vedenkäsittelyn lämmöntalteenotto ja HK5 savukaasupesurin lämmöntalteenotto on huomioitava lämmöntalteenoton optimoinnissa.

Tässä työssä määritettiin Rauman mittarit ja jatkossa vaadittavat parannukset. Energiatehokkuuden laskentasovellusta ei tämän työn aikana tehty. Testiaineiston puuttumisen takia ei tiedetä, miten energiatehokkuusmittarit toimivat käytännössä.

12. YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli luoda sovellus voimalaitosten operaattoreille energiatehokkuuden hetkelliseen valvontaan. Taustalla energiatehokkuuden optimoinnissa ovat: energiatehokkuuden jatkuva parantaminen, polttoaineen energiasisällön mahdollisimman hyvä hyödyntäminen ja päästöjen vähentäminen.

Sovelluksen avulla laitoksen käyttöhenkilökunnan pitäisi tietää onko laitos tietyssä toimintapisteessä mahdollisimman energiatehokas. Työn kokeellinen osa aloitettiin tutustumalla case-laitoksiin. Tämän jälkeen analysoitiin laitoksien erityispiirteet ja tehtiin kartoitus energiatehokkuusmittareista. Tässä ajattelun perustana oli kaaviomalli, jossa lähdettiin liikkeelle päämittareista, niihin vaikuttavista alamittareista ja näitä selittävistä suureista. Tällä tavalla saatiin looginen syy ja seuraus mittareille. Mittareiden validoinnilla karsittiin mittarit, joihin ei pystytty työssä olevilla menetelmillä vaikuttamaan. Energiatehokkuusmittarin muutostilanteessa on tiedettävä poikkeaman syy, jotta on mahdollista etsiä sopivat työkalut sen korjaamiseen. Mittareiden luonnin taustatyönä tehtiin datan analysointia. Ajanjaksoksi valittiin aikaväli, joka kuvaa parhaiten laitoksien kaikkia käyntitilanteita.

Energiatehokkuuden parantamisessa tunnistetaan tilanteet, joissa laitoksen energiatehokkuus on alhainen. Tämän jälkeen analysoidaan mahdollinen energiatehokkuuden parantaminen tai ylläpitäminen. Energiatehokkuuden valvonnassa etsitään laitosta parhaiten kuvaavat mittarit. Laitostyyppin ja laitoksen erityispiirteiden perusteella valitaan mittarit, jotka eivät ole riippuvaisia monista mittauksista. Mittareita ei saa olla liikaa, jotta vältetään ylimääräiseltä tiedolta ja pystytään keskittymään olennaisimpiin parannuskohteisiin. Työssä havaittiin CHP-laitoksen haasteellisuudet ja monet mahdollisuudet. Muuttuvia suureita on erittäin paljon ja hyvällä systeemijattelulla kokonaisuuden hallinta pystytään toteuttamaan parhaiten. Hyvällä ajotapojen optimoinnilla ei lisätä kunnossapitokustannuksia, eikä lyhennetä pääkomponenttien ikää.

Tehtyjen data-analysointien perusteella nähtiin laitoksien teoreettinen parannuspotentiaali. Tiedetään, että laitoksella on mahdollisuus olla tietyllä energiatehokkuuden tasolla, vaikka aina siihen ei päästä. Laitoksien on etsittävä syyt, minkä takia tiettyihin tasoihin ei ole mahdollisuutta päästä ja pyrittävä parantamaan näitä osa-alueita. Testausvaiheen jälkeen nähdään, mihin tasoon on käytännössä mahdollisuus päästä. Energiatehokkuuden seuraaminen tietyssä toimintapisteessä mahdollistaa laitoksen sisäisen vertailemisen vastaavalla kuormalla tai vuodenaikana. Ominaisenergiankulutuksilla on myös mahdollista verrata laitoksia keskenään ja näin optimoida tietyn laitoksen toiminta.

Sovelluksen testausvaihe jäi Tahkoluodon seisonta-ajan sekä Rauman toteutuksen takia suunniteltua vähäisemmäksi. Tehdyt testaukset osoittivat, että sovelluksella saadaan tavoiteltu informaatio. Sovelluksen paras hyödyntäminen vaatii pitkän testiajanjakson, jotta mittarit saadaan viritettyä tarpeeksi hyvin. Raja-arvojen ylityksiä ei saa tulla liikaa eikä liian vähän. Raja-arvoille on löydettävä laitoskohtaisesti sopiva tasapaino. Mittareita ei saa myöskään virittää liian tiukalla, jotta ei aiheuteta ongelmia laitoksen käytettävyydelle. Työ on kuitenkin osoittanut laitoksien potentiaalinen energiatehokkuuden parantamisessa, jolla on mahdollisuus saada pitkällä aikavälillä taloudellisia etuja. Energiatehokkuus on kokonaisuus, jossa on huomioitava monet osa-alueet. Voimalaitosten energiatehokkuuden valvontasovellus on tärkeä osa tätä kokonaisuutta. Energiatehokkuuden valvonnalla laitoksen käyttövarmuus paranee, säästetään polttoainetta, saadaan tieto vikaantuneista mittauksista sekä löydetään eri vuorojen parhaat ajotavat.

LÄHTEET

Ahonen, Tero. 2012. Taajuusmuuttaja pumppujen ja puhaltimien tarkkailussa. Energiatehokkuuspäivät, seminaariesitys 19.4.2012. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia. Saatavana: www.lut.fi. Viitattu: 26.4.2012.

Ahonen, V. 1979. Höyrytekniikka 1. Otapaino, Espoo. ISBN 951-671-217-7.

Ahtila, Pekka. 2012. Biopolttoaineiden kuivaus. Aalto yliopisto. Sekundäärienergiat hyödyksi NYT, seminaariesitys 12.5.2012. Saatavana: <http://www.motiva.fi/julkaisut/>. Viitattu 26.6.2012.

Anon., SFS-EN 12952-15:en. Water-tube boilers and auxiliary installations, Suomen standardoimisliitto SFS, Part 15: Acceptance tests, 2003, 89s.

Anon. 2000. ANSI/ASME PTC 12.1 – 2000. Closed Feedwater Heaters.

Antikainen, Riina, Tenhunen, Jyrki, Ilomäki, Mika, Mickwitz, Per, Punttila, Pekka, Puustinen, Markku, Seppälä, Jyri, Kauppi, Lea. 2007. Bioenergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat, nykytilakatsaus. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007. ISBN (pain.) 1976–1718.

Aura, L., Tonteri, A. Teoreettinen sähkötekniikka. WSOY Helsinki 2005. ISBN 951-0-21385-3.

Cengel, Y.A. & Boles, M.A. 2011. Thermodynamics: An Engineering Approach. Seventh edition; McGraw-hill.

DIN 1943. Thermal Acceptance Tests of Steam Turbines. 1975.

EK. 2012. Elinkeinoelämän keskusliitto. Saatavana: www.ek.fi. Viitattu: 2.3.2012.

Ekman, Heikkinen, Becker, Äijälä, Kouvo. Energiantuotannon rikkipäästöjen teknistaloudelliset vähentämismahdollisuudet vuonna 2000. Ympäristöministeriö. Helsinki 1992. Valtion painatuskeskus. 126s.

El-Wakil, M.. 1984. Power Plant Technology. International edition. ISBN 0-07-066274-6.

Energiateollisuus ry. 2008. Energiateollisuuden näkemys energiatehokkuuden edistämiseksi: Energiatehokkuus avainasemassa ilmasto- ja energiahaasteiden ratkaisemisessa. Saatavana: www.energiateollisuus.fi (viitattu 2.3.2012).

European Commission. Reference Document for Best Available Techniques for Energy Efficiency 2/2009. EuP directive 13. [148, EC, 2005]. Saatavana: <http://www.emis.vito.be/european-bat-reference-documents-brefs> (viitattu: 10.03.2012).

European Commission 2012. [www] viitattu 11.05.2012. Saatavana: http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.

Heikkilä, Huumo, Hyytiä, Seitsalo, Siitonen. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT), Teollisuuden energiatehokkuus. Suomen Ympäristökeskus 2008 Helsinki. ISBN 978-952-11-3330-5 (pdf). Viitattu 01.02.2012. Saatavana: www.ymparisto.fi/julkaisut

Holmber, H., Ahtila, P., Arhippainen, P. & Spets J-P. 2000. Sekundäärilämpöjen hyödyntäminen metsäteollisuuden käyttämien kiinteiden biopolttoaineiden kuivauksessa. Espoo, Teknillinen korkeakoulu.

Holmström, Paavo. Lauhduttimet teoria ja käytäntö. Gummerus 1982. ISBN 951-9405-21-6

Huhtinen, Kettunen, Nurminen, Pakkanen. Höyrykattilatekniikka. Edita opetushallitus 2000. 5. Painos. ISBN 951-37-3360-2.

Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen. Voimalaitostekniikka, opetushallitus 2011. ISBN 9 978-952-13-3476-4.

Hämäläinen, J., Makkonen, P. 2003. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Viitattu: 21.05.2012. Saatavana: <http://koti.mbnet.fi/ppom/PDF/R.Y.pdf>

International Energy Agency (IEA). 2010. Power Generation from Coal; Measuring and Reporting Efficiency Performance and CO2 Emissions. Viitattu: 23.03.2012. Saatavana: http://www.iea.org/ciab/papers/power_generation_from_coal.pdf

International Energy Agency (IEA). 2009. World Energy Outlook. Saatavana: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/WEO2009.pdf> (viitattu 04.04.2012)

Jalovaara, J., Aho, J., Hietämäki, E. & Hyytiä, H. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. SYKE. Suomen ympäristö 649. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. ISBN 952-11-1488-6.

Joronen, Kovacs, Majanne. 2007. Voimalaitosautomaatio. Suomen Automaatioseura ry. 3. painos. ISBN 978-952-5183-32-0.

Kara, Kärkkäinen, Viinikainen. Voimalaitosten omakäyttösähkön määrittely. Kauppa- ja teollisuusministeriön (KTM) tutkimuksia ja raportteja 14/1998. ISBN 951-739-380-6.

Kaukolämmityksen käsikirja. 1989. Helsinki, Energiataloudellinen yhdistys, Raportti 23/1989. 343 s.

Koski, Timonen, Kohtamäki, Suominen. Voimalaitoksen energia-analyysi, Electrowatt-Ekono Oy. Motiva 2002. ISBN 952-5304-15-9.

Koski, Kosti. Energiatehokkuuden parantaminen edellyttää sen mittaamista. Enertec 2-3/ 2010. Saatavana www.indmeas.com/julkaisut (viitattu 04.04.2012)

Laininen, P. 1998. Todennäköisyys ja sen tilastollinen soveltaminen. Otatieto, Helsinki, 308s.

Laukkanen, V. Energiantuotannon optimointi edellyttää hyvää mittauslaatua. Promaint 6/ 2011. Saatavana: <http://www.indmeas.com/julkaisut> (viitattu 04.04.2012)

Maa- ja metsätalousministeriö (MMM) 2012; Miten väistämättömään ilmastonmuutokseen pystytään varautumaan, yhteenveto suomalaisesta sopeutustutkimuksesta eri aloilla. Viitattu 10.05.2012 Saatavana: http://www.mmm.fi/attachments/mmm/julkaisut/julkaisusarja/2012/67Wke725j/MMM_julkaisu_2012_6.pdf.

Majanne, Y. Ympäristötehokkuuden monitorointia Salmisaaren voimalaitoksella. Automaatioväylä 7/2010.

Makkonen, P 2000. Huonolaatuisten polttoaineiden poltto leijukattilassa. Foster Wheeler Energia Oy, Karhulan tutkimus- ja kehityskeskus. Viitattu 13.05.2012. Saatavana: <http://koti.mbnet.fi/ppom/PDF/Kemia97.pdf>

Metso Automation. 2009a. Metso DNA-tuotekuvaus.

Metso Automation. 2012. Sisäiset dokumentit.

Metso Automation 2012a. Nuohouksen optimointi, tuote-esite.

Metso Power. 2007a. Fluidized bed combustion technology. (Sisäinen dokumentti)

Metso Power 2007b. Cymic. (Sisäinen dokumentti)

Metso Power 2011. HYBEX product training. (Sisäinen dokumentti)

Metso 2012b. Metson verkkosivut. Saatavana: www.metso.com. Viitattu 3.2.2012.

Mills, A. F. Basic Heat & Mass transfer, second edition 1999. ISBN 0-13-096247-3.

Motiva. Höyry-lauhde-siirtojärjestelmä, Teollisuuden energiatehokkuus. Käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan ohjeistus 11/2011. Saatavana: http://www.motiva.fi/files/4892/H_L_toteutusohje_2011.pdf (viitattu 24.03.2012).

Motiva. Päte-analyysi-paineilman energia-analyysimalli 2006. Saatavana <http://www.motiva.fi/julkaisut/>. Viitattu 05.06.2012.

Motiva; Energiatehokkuussopimusten tuloksia 2008-2010. Viitattu: 11.05.2012. Saatavana: http://www.motiva.fi/files/5366/Energiatehokkuussopimukset_tuloksia_2008-2010.pdf

Motiva. 2010. Työ- ja elinkeinoministeriön teettämä raportti. Energiatehokkuus strategiasta arkeen. Viitattu 02.05.2012. Saatavana: <http://www.motiva.fi/julkaisut/>.

Muilu, Tiainen. Energiatehokkuutta voimalaitokselle 2006. Energia; Kunnossapito 6/2006 sivut: 20-23.

Patterson, Murray, G. What is Energy Efficiency; Energy Policy 1996, Vol. 24 No 5 pages 377-390.

Perttula, J. Energiatekniikka 1. Painos 2000. Porvoo, WS Bookwell Oy. ISBN 951-0-24909-2. 204 s.

Pirilä, P. 2008. Ene-59.2101 Energiatalous. Teknillinen korkeakoulu; Energiatekniikan laitos.

Pohjolan Voima Oy yleisesite 2012. Saatavana www.pvo.fi. Viitattu 16.04.2012.

Puhakka, P. 2012. Energiatehokkuuden tulevaisuus. Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM), energiaosasto. Energiatehokkuuspäivien 19–20.2012 seminaariesitys. Saatavana: www.lut.fi. Viitattu 24.4.2012.

Raiko, M., Lyytikäinen, R., Vessonen, K. ja Mielonen, P., Voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät, Imatran Voima Oy, Helsinki 1991, ISBN 951-8928-71-1, 50s.

Raiko, R., Saastamoinen, Hupa, Kurki-Suonio. Poltto ja palaminen, toinen täydennetty painos. Jyväskylä 2002. Gummerus Kirjapaino Oy. 750s. ISBN 951-666-604-3.

Raiko & Kirvelä 2005. Energiatekniikan perusteet; luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristötekniikan osasto, Energia- ja prosessitekniikka.

Rauman Voima Oy yleisesite. Saatavana www.pohjolanvoima.fi/julkaisut (viitattu 15.02.2012)

Stenvik, T., Airikka, P., Tuomi, A. & Koukkari-Halme, K. Energiatehokkuus osaksi laitoksen arkea – automaatio ja sovitut askelmerkit avuksi. Automaatio väylä 7/2011.

Stultz, S. C. & Kitto, J. B. 1992. Steam / Its Generation and Use. 40th edition. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A..

Sulzer 2012. Energiatehokkuuspäivät 19-20.4.2012. Saatavana: www.lut.fi. Viitattu 28.4.2012.

Tahkoluoto. PVO-lämpövoima Tahkoluodon voimalaitosesite. Saatavana www.pohjolanvoima.fi/julkaisut (viitattu 03.04.2012).

Zenger, Pekka. 2002. The Use of Energy Analysis for Defining the Energy Efficiency of a Power plant. Research for a Licentiate's Thesis. Tampere University of Technology.

VTT Energia. Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 3. Painos, Edita, Helsinki 2004. ISBN 951-37-4256-3.

Väisänen, Heikki. Energiatehokkuusdirektiivi tuo uusia haasteita. Työ- ja elinkeinoministeriö. [www] Saatavana: <http://www.energia.fi/sites/> (viitattu: 26.03.2012)

Wiksten, Ralf. Lämpövoimaproessit. Yliopistokustannus, Otatieto Oy 1996. ISBN 951-672-230-x.

Ympäristöministeriö 2011. Puheloinen, Ekroos, Warsta, Watkins, Harju-Oksanen ja Dahl. Teollisuuden päästödirektiivin (IED) voimaansaattaminen ja muita ympäristönsuojelulain kehittämisajatuksia. Ympäristöministeriön raportteja 6/2010.

Zeitz, R. 1997. Energy Efficiency Handbook. Council of Industrial Boiler Owners. 64 p.

Äijälä, A. 1993. Todennäköisyyslaskenta ja tilastotiede. Tammertekniikka, Jyväskylä.

Haastattelut

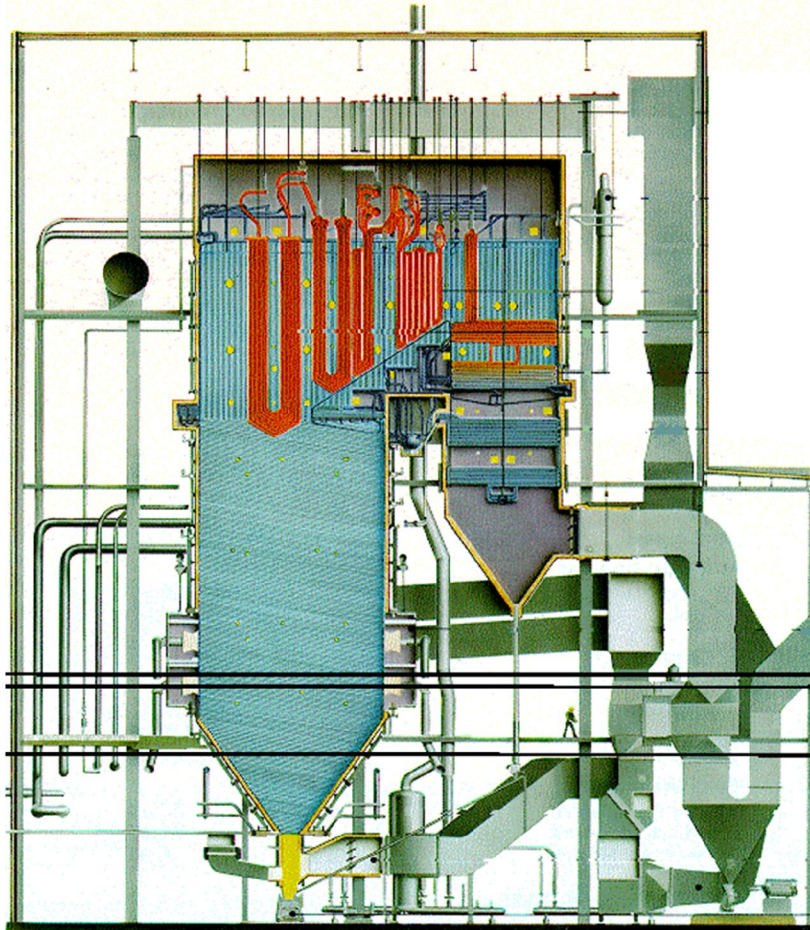
Torsti Nuto, Proma-Palvelut Tahkoluodon voimalaitos

Eero Niemitalo, Rauman Voima

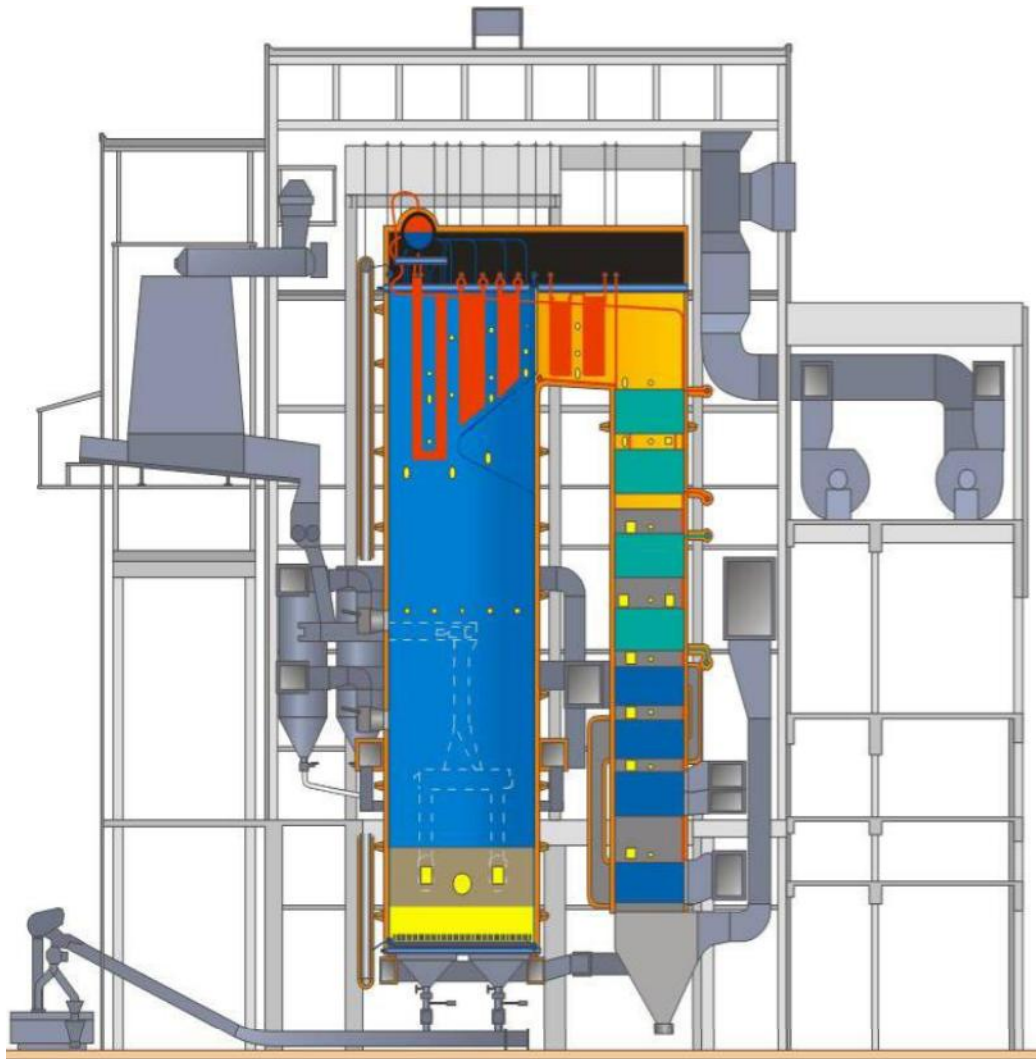
Risto Raiko, Tampereen teknillinen yliopisto

Markku Muilu Fortum Heat Division, Suomenojan voimalaitos

LIITE 1: TAHKOLUODON KATTILA

**TAMPELLA****TAMPELLA -BABCOCK
BOILER****200 kg/s****Boiler Division F 291**

LIITE 2: RAUMA HK6



LIITE 3: RAUMA HK5

